

การศึกษาทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง  
สำหรับสายเคเบิลแรงสูง 22 kV

นายรัฐเขต เทียมศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2555

**STUDY OF ELECTRICAL TREEING IN CROSSLINKED  
POLYETHYLENE INSULATING MATERIAL  
FOR 22 kV HIGH VOLTAGE CABLE**

**Ratthakhet Thiamsri**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering  
Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2012**

การศึกษาทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับ  
สายเคเบิลแรงสูง 22 kV

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(ผศ. ดร.วิมลลักษณ์ สุตะพันธ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. รอ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รัฐเขต เทียมศรี : การศึกษาทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับ  
สายเคเบิลแรงสูง 22 kV (STUDY OF ELECTRICAL TREEING IN CROSSLINKED  
POLYETHYLENE INSULATING MATERIAL FOR 22 kV HIGH VOLTAGE  
CABLE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 134 หน้า.

การใช้งานสายเคเบิลใต้ดินเป็นระยะเวลานานอาจทำให้เกิดการเสื่อมอายุ  
จากความเครียดต่าง ๆ อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ตัวอย่างเช่น ความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียด  
ทางกล และความเครียดทางความร้อน เป็นต้น ทริอิงทางไฟฟ้าเป็นหนึ่งในหลายลักษณะ  
การเสื่อมอายุของสายเคเบิล ที่เกิดจากความเครียดทางไฟฟ้าแล้วนำไปสู่การผิพร่องของ  
สายเคเบิลในที่สุด ดังนั้นความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับคุณลักษณะการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าจึงมี  
ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของความถี่ อุณหภูมิ  
และรูปคลื่นแรงดันต่อลักษณะการเกิดทริอิงทางไฟฟ้า งานวิจัยเริ่มต้นจากออกแบบและสร้าง  
ชุดทดสอบทริอิงทางไฟฟ้า ส่วนวัสดุทดสอบแต่ละชิ้นเตรียมจากสายเคเบิลแรงสูงใต้ดินสำหรับ  
ระบบ 22 kV ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน นำมาตัดตามขวางให้มีขนาดหนา 5 mm หลังจากลอกเปลือก  
หุ้มแล้วนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 5 นาที่ จากนั้นใช้อิเล็กโตรดปลายแหลม  
เสียบเข้าไปในเนื้อฉนวน ให้มีระยะห่างจากตัวนำ 2.5 mm ทำการเชื่อมต่อไฟฟ้าแรงสูงเข้ากับ  
อิเล็กโตรดปลายแหลมและเชื่อมต่อตัวนำลงดิน ในการศึกษาครั้งนี้ใช้คลื่นแรงดันรูปไซน์และ  
คลื่นแรงดันรูปสามเหลี่ยม โดยมีความถี่ 50 Hz 100 Hz 500 Hz 1000 Hz และ 2000 Hz และ  
อุณหภูมิที่ใช้ประกอบด้วย 25°C 60°C 75°C และ 90°C ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าลักษณะ  
รูปแบบของทริอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแบ่งได้ 2 แบบคือ ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม และทริอิง  
ทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง การขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งมีความรวดเร็วและรุนแรง  
มากกว่าการขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม และสามารถนำไปสู่ความผิพร่องของ  
ฉนวนได้เร็วกว่าแบบคล้ายพุ่ม การขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความถี่ของ  
แรงดันไฟฟ้าถ้าความถี่สูงการขยายตัวก็เร็วขึ้นตามไปด้วย ผลของอุณหภูมิพบว่า เมื่ออุณหภูมิ  
สูงขึ้นการขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าก็สูงขึ้นตามไปด้วย ส่วนผลของรูปคลื่นแรงดันพบว่า  
ที่รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยมความถี่ต่ำการขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าเร็วกว่าแบบรูปคลื่นไซน์  
ในขณะที่ความถี่สูงทริอิงทางจากรูปคลื่นแรงดันไซน์ขยายตัวเร็วกว่าแบบรูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม  
นอกจากนี้เมื่อนำฉนวนที่ผ่านการทดสอบมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและ  
โครงสร้างทางกายภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR  
พบว่าพันธะระหว่าง C=C ซึ่งแสดงการเกิดปฏิกิริยาการบอนด์ในเซชันมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น  
และพันธะระหว่าง C=O ซึ่งแสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



แสดงถึงการเสื่อมอายุของฉนวน ส่วนการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพตรวจสอบด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ พบว่า ทริอิงทางไฟฟ้าแบบกึ่งมีการเผาไหม้ที่รุนแรงกว่าทริอิงทางไฟฟ้าแบบพุ่มโดยสังเกตจากสีและขนาดของช่องว่างของฉนวนที่เกิดการกัดเซาะจากทริอิงทางไฟฟ้า



สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2555

ลายมือชื่อนักศึกษา\_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา\_\_\_\_\_

RATTHAKHET THIAMSRİ : STUDY OF ELECTRICAL TREEING IN  
CROSSLINKED POLYETHYLENE INSULATING MATERIAL FOR 22 kV  
HIGH VOLTAGE CABLE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF.  
BOONRUANG MARUNGSRI, D.ENG., 134 PP.

#### ELECTRICAL TREEING/XLPE INSULATED/CABLE AGEING

Under long term in service, ageing of underground cable caused by various stresses, i.e. electrical, mechanical and thermal stresses may occur unavoidably. Basically, electrical treeing caused by electrical stress is one of many ageing indicators of XLPE insulated cable. The occurrence of electrical treeing leads to cable failure. So, knowledge of electrical treeing is very important for improving performance of underground cable. This thesis studied effect of various factors, i.e. wave shape and frequency of electrical stress and thermal stress, to the occurrence of electrical treeing in 22 kV cross-linked polyethylene (XLPE) insulated cable for distribution system. Firstly, a testing chamber for electrical treeing was designed and was built. Numbers of hollow disk of XLPE insulating material with a thickness 5 mm taken from unused high voltage cable were used as test specimen in this study. All specimens were then dried at elevated temperature of 110°C for 5 minute. Stainless steel needle was inserted gradually into the specimen to give a tip to earth plane electrode separation of 2.5 mm. Applied voltages having sinusoidal and triangle waveforms with various frequencies, i.e. 50,100, 500, 1000 and 2000 Hz, were defined as electrical stress. In addition various temperatures, i.e. 25°C, 60°C, 75°C and 90°C were defined as thermal stress. Two types, bush and branch treeings, were observed from the study results. By the results, propagation speed of branch treeing is

faster than bush treeing. In a case of frequency, propagation speed of electrical treeing increased with increasing frequency of applied voltage stress. In a case of thermal stress, propagation of electrical treeing increased with increasing test temperature. In a case of wave shape, two characteristics of propagation speed were observed. Under low frequency, propagation speed of electrical treeing from specimen subjected to sinusoidal waveform voltage stress is slower than propagation speed of electrical treeing from the specimen subjected to triangle waveform voltage stress. While under high frequency, opposite tendency of propagation speed of electrical treeing comparing with those under low frequency was observed. Faster propagation speed was observed from the specimen subjected to sinusoidal waveform voltage stress comparing with the specimen subjected to triangle waveform. Furthermore, physical damage and chemical change were also analyzed on tested specimens. Chemical change was analyzed using FTIR spectroscopy. By chemical analysis results, increasing of C=C bonds (Carbonization) and C=O bonds (Oxidation) was observed. For physical damage, obviously damaged surface was observed on tested specimen with branch treeing comparing to the tested specimen with bush treeing.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2012

Student's Signature\_\_\_\_\_

Advisor's Signature\_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่งและให้ความรู้ด้านวิชาการมาโดยตลอด รวมถึงการเป็นแบบอย่างที่ดีในทุก ๆ ด้านให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ ดร. สุธเขต พจน์ประไพ อาจารย์สาขาวิศวกรรมเซรามิกที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือที่จำเป็นต่องานวิจัยอย่างยิ่ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิมลลักษณ์ สุธะพันธ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมพอลิเมอร์ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่ง อีกทั้งยังได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ให้คำปรึกษาแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ เขียวสูงเนิน และบุคลากรฝ่ายงานพัฒนาเครื่องมือและปรับปรุงห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณจิรทีปต์ สุทธิลักษณ์ และบุคลากรฝ่ายห้องปฏิบัติการวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนการใช้เครื่องมือ และให้คำปรึกษาต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณสุวิทย์ เพ็ญสังกะ และบุคลากรฝ่ายห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนการใช้เครื่องมือ และให้คำปรึกษาต่อผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ คงมันกลาง คุณประวีตรา หมายสุข และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสังคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานของผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณอัญชลี รักด่านกลาง คุณภัทรวรรณ เกนพะนาน ที่ได้ช่วยติดต่อประสานงานกับฝ่ายต่าง ๆ ให้กับผู้วิจัยเป็นอย่างดี

ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่ทำให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณนางรัชพร เทียมศรี ผู้เป็นมารดา นายคณาวุฒิ เทียมศรี ผู้เป็นบิดา ที่ให้ความรักความห่วงใย และการส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างเปี่ยมล้นตลอดมาจนทำให้ผู้วิจัยไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นตลอดมา

รัฐเขต เทียมศรี



## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น .....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญาและสมมติฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.3 สรุป.....	9
3 ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง.....	10
3.1 กล่าวนำ.....	10
3.2 วัสดุพอลิเมอร์สำหรับฉนวนสายเคเบิล .....	10
3.2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุพอลิเมอร์ตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุล ....	11
3.2.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์ .....	12
3.2.3 พอลิเอทิลีน .....	14
3.2.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

3.2.5	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง .....	17
3.2.6	พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง .....	17
3.3	คุณสมบัติของพอลิเมอร์ .....	18
3.3.1	คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิเมอร์ .....	18
3.3.2	คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ .....	20
3.3.3	ปรากฏการณ์การเกิดผลึก การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อน .....	21
3.4	สายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง .....	27
3.4.1	วิวัฒนาการของสายเคเบิล .....	27
3.5	โครงสร้างและวัสดุของสายเคเบิล .....	29
3.5.1	วัสดุตัวนำไฟฟ้า .....	29
3.5.2	วัสดุฉนวน .....	32
3.5.3	วัสดุกำบังสารกึ่งตัวนำ .....	34
3.5.4	ปลอกหุ้ม .....	34
3.6	กระบวนการผลิตสายเคเบิลฉนวน XLPE .....	35
3.6.1	กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแนวระนาบ .....	37
3.6.2	กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบ MDCV .....	38
3.6.3	กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวตั้ง .....	39
3.7	การเสื่อมอายุของสายเคเบิลไฟฟ้า .....	42
3.7.1	กลไกการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ .....	42
3.7.2	กระบวนการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE .....	43
3.7.3	ปรากฏการณ์ที่รื้อจากน้ำ .....	44
3.7.4	ปรากฏการณ์ที่รื้อทางไฟฟ้า .....	47
3.8	สรุป .....	49
4	การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิล XLPE .....	51
4.1	กล่าวนำ .....	51
4.2	ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิล XLPE .....	51

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในการวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้า .....	53
4.3.1	PDE Toolbox.....	53
4.3.2	การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าโดยใช้ PDE Toolbox.....	54
4.4	สรุป .....	58
5	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	59
5.1	กล่าวนำ .....	59
5.2	การออกแบบและสร้างชุดศึกษาและวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้า.....	59
5.2.1	อ่างแก้วทนความร้อน .....	60
5.2.2	ชุดควบคุมอุณหภูมิ .....	60
5.2.3	ระบบกล้องจุลทรรศน์ .....	64
5.3	การศึกษาและวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE.....	67
5.3.1	การตัดชิ้นงานฉนวน XLPE.....	67
5.3.2	การศึกษาและวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE .....	71
5.4	สรุป .....	73
6	ผลการวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าและการวิเคราะห์ผล .....	74
6.1	กล่าวนำ .....	74
6.2	รูปแบบของทรีอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน XLPE .....	74
6.2.1	ศึกษาผลของความถี่แรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้า.....	88
6.2.2	ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้า.....	90
6.2.3	ศึกษาผลของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่มีผลต่อการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้า ...	92
6.3	การเกิดออกซิเดชันและการบ่อนในเซชันจากทรีอิงทางไฟฟ้า.....	94
6.3.1	การเกิดออกซิเดชันบนฉนวน XLPE .....	95
6.3.2	การเกิดคาร์บอนในเซชันบนฉนวน XLPE.....	95
6.4	การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE .....	96
6.4.1	เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโตรสโกปี .....	96



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.4.2	การตัดฉนวน XLPE สำหรับตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี.....	101
6.4.3	การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่เกิดหรือทางไฟฟ้า.....	104
6.5	การตรวจสอบโครงสร้างกายภาพของฉนวน XLPE .....	111
6.6	สรุป .....	114
7	สรุปและข้อเสนอแนะ .....	116
7.1	สรุป .....	116
7.2	ข้อเสนอแนะ .....	119
รายการอ้างอิง	.....	120
ภาคผนวก	.....	122
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	.....	122
ประวัติผู้เขียน	.....	134

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
3.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้.....	13
3.2 คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์.....	20
3.3 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ $T_g$ และ $T_m$ ของวัสดุพอลิเมอร์.....	25
3.4 คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นฉนวน ของสายเคเบิลไฟฟ้า.....	26
3.5 วิวัฒนาการและการพัฒนาการของสายเคเบิล.....	28
3.6 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำไฟฟ้า.....	30
3.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ.....	30
3.8 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะที่ใช้ในการทำสายเคเบิล.....	31
3.9 ประเภทของฉนวนสายเคเบิลได้ดิน.....	35
6.1 การเกิดและการขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าเทียบกับเวลา โดยใช้รูปคลื่นแรงดันไซน์ ที่อุณหภูมิ $25^\circ\text{C}$ .....	89
6.2 การเกิดและการขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าเทียบกับเวลา โดยใช้รูปคลื่นแรงดันไซน์ ความถี่ 50 Hz ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	91
6.3 การเกิดและการขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าเทียบกับเวลา โดยใช้รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ $25^\circ\text{C}$ .....	93
6.4 ความถี่ของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันบางชนิด.....	99
6.5 ค่าอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของพันธะระหว่าง $\text{C}=\text{C}$ และ $\text{C}=\text{O}$ ในตำแหน่งที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้าคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์.....	109

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 โครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ .....	12
3.2 โครงสร้างพอลิเอทิลีนจากเอทิลีน .....	14
3.3 โครงสร้าง Spherulite ของพอลิเอทิลีน .....	15
3.4 รายละเอียดของโครงสร้าง Spherulite .....	15
3.5 ขั้นตอนการเสียรูปของวัสดุพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก .....	16
3.6 ลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน และแบบกึ่งผลึก.....	19
3.7 อัตราส่วนผลึกกับแกนเวลาของวัสดุพอลิพรอพิลีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	23
3.8 ปริมาตรจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ .....	25
3.9 ส่วนประกอบของสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์.....	29
3.10 สายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE .....	35
3.11 แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ CCV.....	38
3.12 แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ MDCV.....	39
3.13 แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ VCV .....	41
3.14 โรงงานผลิตสายเคเบิลระบบแรงดันสูงพิเศษ ตั้งอยู่ทางตอนเหนือของสหรัฐอเมริกา.....	41
3.15 การเกิดปรากฏการณ์ทริอิงก์น้ำในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง ก. การเกิดจากภายในสู่ภายนอก ข. การเกิดจากภายนอกสู่ภายใน .....	45
3.16 ทริอิงก์น้ำในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง ก. Bow-Tie Treeing ข. Vented Treeing .....	47
3.17 ทริอิงก์ทางไฟฟ้าในฉนวน.....	48
3.18 รูปแบบของทริอิงก์ทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE .....	49
4.1 ทรงกระบอกซ้อนกัน.....	52
4.2 ขนาดของฉนวนและอิเล็กโทรดที่ใช้ในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า .....	54
4.3 การกำหนดขอบเขตแบบ Dirichlet.....	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	การกำหนดขอบเขตแบบ Neumann..... 56
4.5	การกำหนดค่าในสมการ Elliptic ..... 56
4.6	ความสัมพันธ์ของเส้นแรงดันไฟฟ้าในเนื้อฉนวน XLPE ..... 57
4.7	การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายใต้แรงดัน 8 kV ในเนื้อฉนวน ..... 57
5.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ..... 61
5.2	แบบร่างสามมิติของชุดทดสอบทริอิงทางไฟฟ้าใน สายเคเบิลฉนวน XLPE ตามที่ได้ออกแบบไว้..... 61
5.3	แบบร่างสามมิติของชุดทดสอบทริอิงทางไฟฟ้าใน สายเคเบิลฉนวน XLPE ตามที่ได้ออกแบบไว้..... 62
5.4	ไดอะแกรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอุณหภูมิภายในชุดทดสอบ..... 62
5.5	ระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอุณหภูมิภายในชุดทดสอบ ..... 63
5.6	ชุดควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันฉนวนภายในชุดทดสอบ ..... 63
5.7	ชุดทดสอบทริอิงทางไฟฟ้าและกล่องควบคุมอุณหภูมิ ..... 64
5.8	กล้องจุลทรรศน์ขนาด 5-500X (MICRO) ที่ใช้ในงานวิจัย ..... 65
5.9	กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในงานวิจัยขนาด 570 X (OLYMPUS SZX9)..... 65
5.10	ระบบกำเนิดสัญญาณและขยายสัญญาณแรงดันสูงที่ใช้ในงานวิจัย ..... 66
5.11	ชุดศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ..... 67
5.12	สายเคเบิลไฟฟ้าแรงดันสูงขนาด 22 kV ที่นำมาศึกษาวิจัย..... 68
5.13	เครื่องตัดเอนกประสงค์แบบหล่อเย็น ..... 69
5.14	ชิ้นงานที่ตัดด้วยเครื่องตัดเอนกประสงค์แบบหล่อเย็น ..... 69
5.15	ชิ้นงาน XLPE ที่ถูกตัดและผ่านการอบไล่ความชื้น ..... 70
5.16	ขั้นตอนการเตรียมสายเคเบิลฉนวน XLPE ..... 70
5.17	แผนผังการศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้า ..... 72
6.1	ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 50 Hz..... 75

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 100 Hz.....	75
6.3 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 500 Hz.....	75
6.4 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 1000 Hz.....	76
6.5 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 2000 Hz.....	76
6.6 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 50 Hz.....	76
6.7 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 100 Hz.....	77
6.8 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 500 Hz.....	77
6.9 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 1000 Hz.....	77
6.10 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 2000 Hz.....	78
6.11 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 50 Hz.....	78
6.12 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 100 Hz.....	78
6.13 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 500 Hz.....	79
6.14 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 1000 Hz.....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.15 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 2000 Hz .....	79
6.16 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 50 Hz .....	80
6.17 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 100 Hz .....	80
6.18 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 500 Hz .....	80
6.19 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 1000 Hz .....	81
6.20 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 2000 Hz .....	81
6.21 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 50 Hz .....	81
6.22 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 100 Hz .....	82
6.23 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 500 Hz.....	82
6.24 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 1000 Hz.....	82
6.25 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 2000 Hz .....	83
6.26 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 50 Hz .....	83
6.27 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 100 Hz.....	83



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.41	เปรียบเทียบการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิ 25°C โดยใช้รูปคลื่นแรงดันไซน์ ..... 90
6.42	เปรียบเทียบการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเทียบกับเวลา โดยใช้รูปคลื่นแรงดันไซน์ ความถี่ 50 Hz โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ..... 92
6.43	การขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวนโดยใช้รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C ..... 94
6.44	เปรียบเทียบการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวนระหว่าง รูปคลื่นแรงดันไซน์และรูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C..... 95
6.45	พันธะโมเลกุลของ XLPE ในการเกิดออกซิเดชัน..... 95
6.46	พันธะโมเลกุลของ XLPE ในการเกิดคาร์บอนในเซชัน ..... 96
6.47	เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี ..... 97
6.48	การสั่นแบบพื้นฐานของหมู่ CH <sub>2</sub> ..... 98
6.49	เครื่องตัดไมโครโทม ..... 102
6.50	ตัวยึดจับชิ้นงานสายเคเบิล..... 103
6.51	ชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดไมโครโทม ..... 103
6.52	FTIR Spectrum ของฉนวน ที่อุณหภูมิ 25°C รูปคลื่นแรงดันไซน์ ..... 104
6.53	FTIR Spectrum ของฉนวน ที่อุณหภูมิ 60°C รูปคลื่นแรงดันไซน์ ..... 105
6.54	FTIR Spectrum ของฉนวน ที่อุณหภูมิ 75°C รูปคลื่นแรงดันไซน์ ..... 105
6.55	FTIR Spectrum ของฉนวน ที่อุณหภูมิ 90°C รูปคลื่นแรงดันไซน์ ..... 106
6.56	FTIR Spectrum ของฉนวน ที่อุณหภูมิ 25°C รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม..... 106
6.57	FTIR Spectrum ของฉนวน ที่อุณหภูมิ 60°C รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม..... 107
6.58	FTIR Spectrum ของฉนวน ที่อุณหภูมิ 75°C รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม..... 107
6.59	FTIR Spectrum ของฉนวน ที่อุณหภูมิ 90°C รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม..... 108
6.60	พันธะของ C=C และ C=O ที่เพิ่มขึ้นหลังจากเกิดทรีอิงทางไฟฟ้า..... 109
6.65	โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE เกิดทรีอิงทางไฟฟ้าแบบพุ่ม ..... 112
6.66	โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE เกิดทรีอิงทางไฟฟ้าแบบกิ่ง ..... 113



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบันนั้น ส่วนใหญ่แล้วเป็นแบบสายส่งวิ่งในอากาศ (Overhead Cable) ข้อดีของสายส่งแบบวิ่งในอากาศ คือใช้อากาศเป็นฉนวนหลัก ซึ่งสามารถกลับคืนสภาพฉนวนได้เองหลังจากเกิดดีสชาร์จหรือเบรกควาน มีราคาในการติดตั้งและซ่อมบำรุงรักษาที่ไม่แพง แต่ก็มีข้อเสียคือ ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อม จากความเปรอะเปื้อน (Pollution) เกิดโคโรนารบกวนระบบสื่อสาร มีการแผ่ออกมาของสนามไฟฟ้า ต้องมีระยะห่างที่ปลอดภัยทางไฟฟ้า และได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าโดยตรง

ข้อดีของสายเคเบิลใต้ดินและใต้น้ำคือ สามารถรักษาสภาพแวดล้อม คงความสวยงามของภูมิทัศน์ ลดปัญหาทางมลภาวะ สามารถติดตั้งหรือเดินสายในที่แคบ ๆ ได้ ไม่ว่าจะเป็นเดินลอยในอากาศหรือเดินฝังดินโดยตรง ทนแรงดันได้สูงและสามารถส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าได้ดีกว่าสายส่งแบบวิ่งในอากาศ ส่วนข้อเสียของสายส่งแบบใต้ดินและใต้น้ำคือ ราคาในการติดตั้งและบำรุงรักษาสูงกว่าสายส่งแบบวิ่งในอากาศมาก และไม่สามารถมองเห็นความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นจากสาเหตุต่าง ๆ ได้แก่ การเสื่อมอายุที่เร็วกว่าปกติจากความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดทางความร้อน ความเครียดทางกล ความเครียดทางสิ่งแวดล้อม และการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิง (Treeing) ทั้งแบบทรีอิงทางไฟฟ้า (Electrical Treeing) และแบบทรีอิงจากน้ำ (Water Treeing) ซึ่งเป็นสาเหตุที่สำคัญมากที่ทำให้สายเคเบิลใต้ดินหรือใต้น้ำเกิดผิดปกติ หากไม่ทราบถึงสาเหตุในการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว

ในปัจจุบัน มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทรีอิงทั้งแบบทรีอิงทางไฟฟ้าและแบบทรีอิงจากน้ำกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวเพื่อหาวิธีในการป้องกันหรือแก้ไข เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดปกติต่าง ๆ ที่จะตามมาในภายหลัง ซึ่งอาจจะส่งผลร้ายแรงต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า และอาจจะส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นของระบบต่าง ๆ ภายในประเทศอีกด้วย สำหรับในประเทศไทยถึงแม้ว่าการส่งจ่ายไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นแบบสายส่งแบบวิ่งในอากาศก็ตาม แต่ก็มีไม่น้อยที่ใช้การส่งจ่ายแบบสายเคเบิลใต้ดินและใต้น้ำ และในอนาคตก็จะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดในด้านพื้นที่ใช้สอย ระยะห่างที่ปลอดภัย ประกอบกับยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์นี้อย่างจริงจัง จึงเป็นที่มาของโครงการวิจัยนี้

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะการเกิดปรากฏการณ์ทริอิงทางไฟฟ้า ในสายเคเบิลฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (Crosslinked Polyethylene: XLPE) สำหรับระบบ 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยศึกษาผลของรูปคลื่นแรงดัน ความถี่ และอุณหภูมิต่อการเกิดปรากฏการณ์ทริอิงทางไฟฟ้า

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบสร้างชุดทดสอบการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบ 22 kV

1.2.2 เพื่อศึกษาลักษณะของการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินระบบ 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของความถี่แรงดันต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบ 22 kV

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของรูปคลื่นแรงดันต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบ 22 kV

1.2.5 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบ 22 kV

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 สายเคเบิลแรงสูงที่ใช้งานจริงเป็นสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.3.2 อุณหภูมิของห้องทดลองอ้างอิงจากอุณหภูมิที่ห้อง B36 ในอาคารวิจัย เป็นหลัก

1.3.3 การวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE จะใช้แรงดันไฟฟ้า 8 kV และอุณหภูมิความร้อนของน้ำมันหม้อแปลงใช้อุณหภูมิ 25°C 60°C 75°C และ 90°C ตามลำดับ

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 การวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE จะใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดัน 8 kV

1.4.2 การวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE จะใช้อุณหภูมิความร้อนของน้ำมันหม้อแปลงที่อุณหภูมิ 25°C 60°C 75°C และ 90°C ตามลำดับ

1.4.3 การวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE จะใช้ความถี่ของแรงดันในช่วง 50 Hz 100 Hz 500 Hz 1000 Hz และ 2000 Hz

1.4.4 การวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE จะใช้รูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Wave) และรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangle Wave)

1.4.5 ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE หลังจากการทดสอบทริอิงทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบ FTIR

1.4.6 ตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ (OLYMPUS SZX9)

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสาเหตุการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลไฟฟ้า

1.5.2 ได้ชุดทดสอบทริอิงทางไฟฟ้าสำหรับสายเคเบิลแรงสูง XLPE

1.5.3 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องการศึกษาทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE สำหรับสายเคเบิลแรงสูง 22 kV ในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการทั้งในและต่างประเทศ

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท

**บทที่ 1** เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย รวมทั้งแนะนำเนื้อหาพอสั่งเขปที่เป็นองค์ประกอบของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

**บทที่ 2** กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

**บทที่ 3** กล่าวถึงทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลและการเสื่อมอายุแบบต่าง ๆ ของสายเคเบิลรวมถึงการเกิดปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำ และปรากฏการณ์ทริอิงทางไฟฟ้า

**บทที่ 4** กล่าวถึงการคำนวณสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 22 kV และการจำลองสนามไฟฟ้าในการศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้า เพื่อหาความเหมาะสมของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดปลายแหลม และระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับระนาบ

**บทที่ 5** กล่าวถึงการออกแบบชุดศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้า การเตรียมตัวอย่างทดสอบ และวิธีการวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

**บทที่ 6** กล่าวถึงผลการวิจัยทริอิงทางไฟฟ้า การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและกายภาพของฉนวน XLPE

**บทที่ 7** กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กล่าวนำ

การศึกษาทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับสายเคเบิลแรงสูง 22 kV โดยใช้ชุดศึกษาวิจัยการสรั้างทรีอิงทางไฟฟ้า สายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ผ่านและไม่ผ่านการวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าจะนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีทางวิทยาศาสตร์ และการสังเกตจากภาพถ่ายด้วยกล้องกำลังขยายสูง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE IEE และ Science Direct เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าว จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

#### 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษาวิจัยสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ทรีอิงทางไฟฟ้า ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยเรียงลำดับจากผลงานของผู้ที่ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่าดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1969	T. Miyashita	ค้นพบปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำครั้งแรก ทำการทดสอบสายเคเบิลฉนวน PE โดยแช่ไว้ในน้ำ และใช้แรงดันไฟฟ้าความถี่สูงเป็นตัวเร่งให้เกิดปรากฏการณ์ทรีอิงขึ้น หลังจากนั้นก็รู้จักปรากฏการณ์นี้ในชื่อ “ทรีอิงจากน้ำ”

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2001	K. Uchida, Y. Kato M. Nakade, D. Inoue, H. Sakakibara, and H. Tanaka	ประมาณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของสายเคเบิล XLPE ที่เกิดปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำด้วยวิธี ใช้แรงดันทดสอบความถี่ต่ำมาก (VLF) (0.01-0.19 Hz) แรงดันทดสอบกระแสสลับ แรงดันทดสอบกระแสตรง และแรงดันคลื่นสั้นพ้อง (Oscillating Wave) ในสายเคเบิล XLPE ขนาด 22 kV 33 kV 66 kV และ 77 kV พบว่าการใช้แรงดันทดสอบความถี่ต่ำมาก (VLF) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด
2001	Z. Al-Hamouz, K. Soufi, M. Ahmed, M.A. Al-Ohali, and M. Garwan	นำเสนอเทคนิคการตรวจวินิจฉัยทางไฟฟ้า เพื่อประเมินการเกิดและขยายตัวของทริอิงจากน้ำในสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดิน โดยใช้สายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานแล้ว และที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ทั้งแบบที่ใช้ทองแดงเป็นตัวนำและที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวนำ มาทำการทดสอบจำนวน 4 ตัวอย่างโดยใช้แรงดันทดสอบ 13.8 kV สำหรับสายเคเบิลใหม่ตัวนำทองแดง 34.5 kV สำหรับสายเคเบิลตัวนำทองแดงอายุการใช้งาน 17 ปีและสายที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และ 69 kV สำหรับสายเคเบิลตัวนำอะลูมิเนียมอายุการใช้งาน 18 ปี เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเกิดทริอิงจากน้ำ พบว่าเกิดทริอิงจากน้ำในสายเคเบิลตัวนำอะลูมิเนียมอายุ 18 ปีเท่านั้น
2002	S.A Boggs and M.S. Mashikian	ศึกษาบทบาทของสารประกอบกึ่งตัวนำในปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำของฉนวนเคเบิล XLPE โดยใช้สารประกอบกึ่งตัวนำในเชิงพาณิชย์จำนวน 5 ชนิดมาทำการทดสอบและวัสดุกำบังอีก 4 ชนิดซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่นปริมาณกำมะถันที่เป็นส่วนผสมในสารประกอบกึ่งตัวนำแตกต่างกัน ทำการทดสอบภายใต้สภาพแห้งและเปียกด้วยความเครียด 3.4 kV/mm ในสภาพแห้ง และ 2.6 kV/mm ในสภาพเปียก พบว่าสารประกอบกึ่งตัวนำสามารถลดการเกิดของทริอิงจากน้ำลงได้ เนื่องจากความสามารถในการทำให้ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ามีค่าสม่ำเสมอ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2005	J.J. Yang and S. Birlasekaran	สร้างทรีอิงไฟฟ้าในตัวอย่างฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางที่ใช้ในระดับแรงดัน 220 kV และตัวอย่างพอลิเอทิลีนแบบโปร่งใส โดยใช้เข็มเป็นอิเล็กโทรดเจาะเข้าไปในเนื้อฉนวน ทำการทดสอบ 3 ครั้ง เพื่อยืนยันผล ทำการวินิจฉัยด้วยการวัด PD ใช้การกระจายของข้อมูลทางสถิติแบบ Weibull ในการวิเคราะห์ วัดค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกและบันทึกภาพจากกล้องกำลังขยายสูงก่อนและหลังการทดสอบ พบว่าทรีอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะคือ ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบพุ่ม(Bush Treeing) และ ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบกิ่ง (Branch Treeing)
2006	J.V. Gulmine and L. Akcelrud	วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวนพอลิเมอร์ LDPE และ XLPE ด้วยเทคนิค ATR-FTIR การเสื่อมอายุของฉนวนพอลิเมอร์กระบวนการเชื่อมขวางนำไปสู่การเกิดกลุ่ม อะซิโตน (Acetophenone) คัมมิลอัลกอฮอล์ (Cumyl Alcohol) และยังเกิดกลุ่มใหม่ๆ เช่น กลุ่มไวนิล กลุ่มคาร์บอนิล ในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ การสะสมของกลุ่มคาร์บอนิลต่าง ๆ ถูกตรวจวัดด้วยเทคนิค ATR-FTIR สเปกตรัมใน LDPE เมื่อมีการเสื่อมอายุจะพบกลุ่มไวนิลที่เลขคลื่น $920 - 900 \text{ cm}^{-1}$ และที่เลขคลื่น $890 \text{ cm}^{-1}$ จะพบกลุ่มของไวนิลิดีน (Vinylidene) การเสื่อมอายุของ XLPE พบว่ามีกลุ่มคาร์บอนิลเพิ่มมาก
2007	K. Suenaga, K. Uchida and N. Hozumi	ศึกษาดำเนินการเกิดทรีอิงจากน้ำ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการเสื่อมสภาพตามแนวสายเคเบิล XLPE ภายใต้แรงดันทดสอบกระแสตรง 6-20 kV ด้วยการวัดกระแสรั่วไหลในฉนวนและใช้เครื่องมือในการตรวจวัด PD โดยเปรียบเทียบสัญญาณที่ตรวจพบ กับสัญญาณสอบเทียบ พบว่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในบริเวณที่เกิดทรีอิงจากน้ำจะมีความหนาแน่นของประจุ PD มากกว่า 100 pC

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2008	X. Zheng and G. Chen	ศึกษาการเสื่อมอายุของสายเคเบิล XLPE จากการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิงทางไฟฟ้าโดยการตรวจสอบ Double Electrical Tree ในระบบแรงสูง 22 kV โดยใช้ชุดทดสอบการเร่งการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิงทางไฟฟ้าและศึกษาผลของความถี่แรงดันที่ใช้ทดสอบ
2011	R. Sarathi, A. Nandini and M. G. Danikas	ศึกษาความผิดปกติของสายเคเบิลฉนวนได้ค้นพบว่าส่วนใหญ่เกิดจากการเกิดและสะสมของทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิลรูปแบบของทรีอิงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ ทรีอิงทางไฟฟ้าที่ตรวจพบได้แก่ ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบพุ่มไม้ (Bush Type Tree) ทรีอิงทางไฟฟ้าเหมือนต้นไม้ (Tree Like Tree) ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบFibrillar และทรีอิงแบบ Intrinsic โดยจะใช้เทคนิคการตรวจวัดด้วยสัญญาณ UHF ระหว่างการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าจะมีการเกิดดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น ซึ่งในระหว่างการเกิดและขยายตัวสัญญาณ UHF จะมีช่วงแถบกว้างของความถี่ (Bandwidth) อยู่ระหว่าง 0.5 – 2.0 GHz

จากการค้นคว้าผลงานวิจัยที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่านักวิจัยได้คิดค้นและนำเสนอการทดสอบทรีอิงในรูปแบบต่าง ๆ ของสายเคเบิลฉนวน XLPE เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังมีการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพ การศึกษาวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าจากการศึกษาปฏิกิริยารังสีที่ค้นคว้าสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

เริ่มต้นจาก Miyashita (1969) ค้นพบปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำครั้งแรก จากการใช้งานสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์เดินผ่านบริเวณที่มีน้ำซึ่งพบว่าสายเคเบิลดังกล่าวเกิดความเสียหาย จึงทำการศึกษาโดยนำสายเคเบิลฉนวน PE โดยแช่ไว้ในน้ำ และใช้แรงดันไฟฟ้าความถี่สูงเป็นตัวเร่งให้เกิดปรากฏการณ์ทรีอิงขึ้น หลังจากนั้นก็รู้จักปรากฏการณ์นี้ในชื่อ “ทรีอิงจากน้ำ” ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการวิจัยและศึกษาทรีอิงตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

Al-Hamouz et al. (2001) นำเสนอเทคนิคการตรวจวินิจฉัยทางไฟฟ้า เพื่อประเมินการเกิดและขยายตัวของทรีอิงจากน้ำ ในสายเคเบิลไฟฟ้าใต้ดิน โดยใช้สายเคเบิลที่ผ่านการใช้งานแล้ว และที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ทั้งแบบที่ใช้ทองแดงเป็นตัวนำและที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวนำ มาทำการ

ทดสอบจำนวน 4 ตัวอย่างโดยใช้แรงดันทดสอบ 13.8 kV สำหรับสายเคเบิลใหม่ตัวนำทองแดง 34.5 kV สำหรับสายเคเบิลตัวนำทองแดงอายุการใช้งาน 17 ปีและสายที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และ 69 kV สำหรับสายเคเบิลตัวนำอะลูมิเนียมอายุการใช้งาน 18 ปี เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเกิดทริอิงจากน้ำ พบว่าเกิดทริอิงจากน้ำในสายเคเบิลตัวนำอะลูมิเนียมอายุการใช้งาน 18 ปีเท่านั้น

Boggs and Mashikian (2002) ศึกษาบทบาทของสารประกอบกึ่งตัวนำ ในปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำของฉนวนเคเบิล XLPE โดยใช้สารประกอบกึ่งตัวนำในเชิงพาณิชย์จำนวน 5 ชนิดมาทำการทดสอบและวัสดุกำบังอีก 4 ชนิดซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณกำมะถันที่เป็นส่วนผสมในสารประกอบกึ่งตัวนำแตกต่างกัน ทำการทดสอบภายใต้สภาพแห้งและเปียกด้วยความเครียด 3.4 kV/mm ในสภาพแห้ง และ 2.6 kV/mm ในสภาพเปียก พบว่าสารประกอบกึ่งตัวนำสามารถลดการเกิดของทริอิงจากน้ำลงได้ เนื่องจากความสามารถในการทำให้ค่าการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ามีค่าสม่ำเสมอ

Yang and Birlasekaran (2005) สร้างทริอิงไฟฟ้าในตัวอย่างฉนวน XLPE ที่ใช้ในระดับแรงดัน 220 kV และตัวอย่าง PE แบบโปร่งใส โดยทำการตัดเนื้อฉนวนออกเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  ใช้เป็นอิเล็กโทรดแรงสูงเจาะเข้าไปในเนื้อฉนวนส่วนด้านตรงข้ามฉาบด้วยวัสดุเงินเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วต่อลงดิน ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงและขั้วต่อลงดิน 2.5 mm จากนั้นนำฉนวนที่ทำการศึกษาแช่ไว้ในน้ำมันซิลิโคนเพื่อป้องกันการเกิดวابلตามผิว ฉายแรงดันเป็นขั้นบันได คือ ค่อย ๆ เพิ่มทีละ 2.5 kV ทุก ๆ 10 นาทีจาก 2.5 kV ถึง 10 kV ทำการทดสอบ 3 ครั้งเพื่อยืนยันผล ทำการวินิจฉัยด้วยการวัด PD ใช้การกระจายของข้อมูลทางสถิติแบบ Weibull ในการวิเคราะห์ วัดค่าสูญเสียไดอิเล็กตริกและบันทึกภาพจากกล้องกำลังขยายสูง ก่อนและหลังการทดสอบพบว่าทริอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมี 2 ลักษณะคือ ทริอิงทางไฟฟ้าแบบพุ่มและทริอิงทางไฟฟ้าแบบกิ่ง

Gulmine and Akcelrud (2006) วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวนพอลิเมอร์ LDPE และ XLPE ด้วยเทคนิค ATR-FTIR แบบดูดกลืน (Absorbance) โดยนำสายเคเบิลฉนวนที่ผ่านการเร่งเสื่อมอายุจาก รังสีแกมมา ความร้อน ในสภาพเปียก-แห้งของสายเคเบิลฉนวน XLPE กระบวนการเชื่อมขวางนำไปสู่การเกิดกลุ่มอะซีโตฟีโนน คัมมิลอัลกอซอล์ และยังเกิดกลุ่มใหม่ ๆ เช่น กลุ่มไวนิล กลุ่มคาร์บอนิล ในสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ การสะสมของกลุ่มคาร์บอนิลต่าง ๆ ถูกตรวจวัดด้วยเทคนิค ATR-FTIR สเปกตรัม ใน LDPE เมื่อมีการเสื่อมอายุจะพบกลุ่มไวนิลที่มีความยาวคลื่น  $920 - 900 \text{ cm}^{-1}$  และที่ความยาวคลื่น  $890 \text{ cm}^{-1}$  จะพบกลุ่มของไวนิลดีนการเสื่อมอายุของ XLPE พบว่ามีกลุ่มคาร์บอนิลเพิ่มมาก



Xie et al. (2010) สํารวจทริองทางไฟฟาภายในชั้นของเคเบิลฉนวน XLPE ที่ใชในระดับแรงดัน 220 kV โดยใชคอมพิวเตอรํช่วยในการตรวจสอบ การขยายตัวของทริองโดยการตัดชิ้นงานฉนวนตามแนวขวางหนา 5 mm นำฉนวนไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 130°C ใชอิเล็กโตรดปลายแหลมทำจากทั้งสแตนเลสขนาดของปลายแหลมเท่ากับ  $3 \pm 1 \mu\text{m}$  เสียบเข้าไปในเนื้อฉนวนเป็นอิเล็กโตรดแรงสูง และใช้ตัวนำทองแดงเชื่อมต่อดินให้ได้ระยะระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสองเท่ากับ 3 mm โดยทำการทดสอบในน้ำมันซิลิโคนเพื่อป้องกันการเกิดวาวไฟตามผิวของวัสดุทดสอบ และตรวจสอบคุณลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยทำการทดสอบที่แรงดันสูง พบว่าทริองที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะคือ ทริองทางไฟฟ้าแบบพุ่มเกิดที่ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 250 Hz ทริองทางไฟฟ้าแบบกิ่งเกิดที่ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 500 Hz ขึ้นไป และทริองทางไฟฟ้าแบบผสมเกิดที่ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 250 Hz

จากข้อมูลปรัทัศน์วรรณกรรมที่ได้ค้นคว้ามาข้างต้นทำให้ทราบถึงระเบียบวิธีค้นคว้าและวิจัยของนักวิจัยหลาย ๆ กลุ่มโดยสามารถนำข้อมูลมาประยุกต์เพื่อการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทริองทางไฟฟ้าในสายเคเบิลใต้ดินฉนวน XLPE โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ ศึกษาผลของความถี่ของแรงดัน และศึกษาผลของรูปคลื่นแรงดันที่มีต่อการเกิดทริองทางไฟฟ้า และยังนำฉนวน XLPE มาทำการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี และโครงสร้างทางกายภาพที่เปลี่ยนไป

## 2.3 สรุป

ในบทที่ 2 นี้ได้นำเสนอวรรณกรรมและการวิจัยในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกังานวิจัยที่จะดำเนินการ โดยค้นคว้าจากฐานข้อมูลของ IEE, IEEE และอื่น ๆ ทำให้ทราบถึงผลงานดำเนินงานวิจัย จุดประสงค์ แนวทางการวิจัยของผู้วิจัยอื่น ๆ ซึ่งจะถูกใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป จากการสืบค้นปรัทัศน์และวรรณกรรมเห็นได้ชัดว่า ฉนวน XLPE กำลังเป็นที่สนใจในงานวิจัยการเสื่อมอายุของฉนวนเคเบิลไฟฟ้า เพราะในปัจจุบันมีการใช้สายเคเบิลใต้ดินโดยใช้ฉนวน XLPE เป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ จึงได้เริ่มทำการวิจัยขึ้นเพื่อทดสอบทริองทางไฟฟ้าของฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน 22 kV ที่นิยมใช้ในประเทศไทย และยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่ใด ทำการทดสอบทริองทางไฟฟ้าในสภาวะพหุความเครียด และทำการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพของเนื้อฉนวน XLPE ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดต่าง ๆ ในบทที่ 3 ต่อไป

## บทที่ 3

### ทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 กล่าวนำ

พอลิเมอร์ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนทางไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลายทั่วโลก เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการผลิตวัสดุพอลิเมอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำวัสดุพอลิเมอร์มาใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลแรงสูง ในปัจจุบันวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้นิยมนำมาใช้ในฉนวนของสายเคเบิลแรงสูงคือ XLPE อย่างไรก็ตาม วัสดุนี้สามารถใช้ได้ทั้งในระบบแรงต่ำ แรงดันปานกลาง และแรงดันสูงถึง 500 kV ดังนั้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 เป็นต้นมาสายเคเบิล XLPE ปริมาณมากจึงได้รับการติดตั้งใช้งานทั่วโลก จากการที่สายเคเบิลฉนวน XLPE ถูกติดตั้งใช้งานกันอย่างแพร่หลายเป็นจำนวนมาก พบว่าการถูกทำลายและความเสียหายของสายเคเบิลฉนวน XLPE ส่วนใหญ่มักมาจากการเกิดปรากฏการณ์ หรือถึงขั้นผู้วิจัยจึงเลือกทำการศึกษาวิจัยทริ่งทางไฟฟ้าในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงได้ดินระบบ 22 kV ที่มี XLPE เป็นฉนวนและจำเป็นต้องรู้ถึงส่วนประกอบและคุณสมบัติต่าง ๆ ของเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงได้ดินอย่างละเอียดเสียก่อน ในบทนี้จึงได้ทำการอธิบายเกี่ยวกับสายเคเบิลฉนวน XLPE อย่างละเอียด โดยอธิบายในเรื่องประเภทของวัสดุพอลิเมอร์ต่าง ๆ ที่ใช้เป็นฉนวน คุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุพอลิเมอร์ วิวัฒนาการและการพัฒนาการของสายเคเบิลโครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิล และคุณสมบัติของฉนวน XLPE สาเหตุการเสื่อมอายุของฉนวนพอลิเมอร์จากปัจจัยต่าง ๆ และการเกิด ทริ่งในสายเคเบิลฉนวน ทั้งทริ่งทางไฟฟ้าและทริ่งจากน้ำ

#### 3.2 วัสดุพอลิเมอร์สำหรับฉนวนสายเคเบิล

ความหมายของวัสดุพอลิเมอร์ คือ สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นห่วงโซ่ยาวและประกอบขึ้นจากพันธะเคมีแบบโควาเลนต์ ห่วงโซ่โมเลกุลโดยทั่วไปจะประกอบด้วยโมโนเมอร์(Monomers) หลายพันตัวเชื่อมต่อกันอยู่ ซึ่งเป็นโมโนเมอร์ที่ซ้ำกันอยู่ในห่วงโซ่โมเลกุล ความยาวของห่วงโซ่โมเลกุลและชนิดของโมโนเมอร์จะเป็นตัวกำหนดความคงทน ความแข็งแรง และแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular Force) ของวัสดุพอลิเมอร์ ปริมาณของแรงระหว่างโมเลกุลขึ้นอยู่กับความยาวของห่วงโซ่โมเลกุล ยิ่งห่วงโซ่โมเลกุลมีความยาวมาก แรงระหว่างโมเลกุลจะมีปริมาณมากไปด้วย และทำให้วัสดุพอลิเมอร์มีความทนทานมากขึ้นต่อการฉีกขาด แตกหัก และการแยกตัวของพันธะด้วยความร้อนสูง วัสดุพอลิเมอร์ถูกประดิษฐ์ขึ้นและใช้งานอย่างกว้างขวางตั้งแต่ช่วงกลางยุคศตวรรษที่ 20 ในปัจจุบัน วัสดุพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

ประกอบด้วย พีวีซี (Polyvinyl Chloride: PVC) พอลิเอทิลีน (Polyethylene: PE) และ พอลิโพรพิลีน (Polypropylene: PP) วัสดุพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการใช้เป็นฉนวนคือ พอลิเอทิลีน ซึ่งมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีที่สุด โดยนำพอลิเอทิลีนทำการแปรรูปให้เป็น วัสดุ XLPE เพื่อนำไปใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิล เนื่องจากมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ต้นทุนการผลิตต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Electric Cables Handbook, 3<sup>rd</sup> edition, G.F. Moore, 1997)

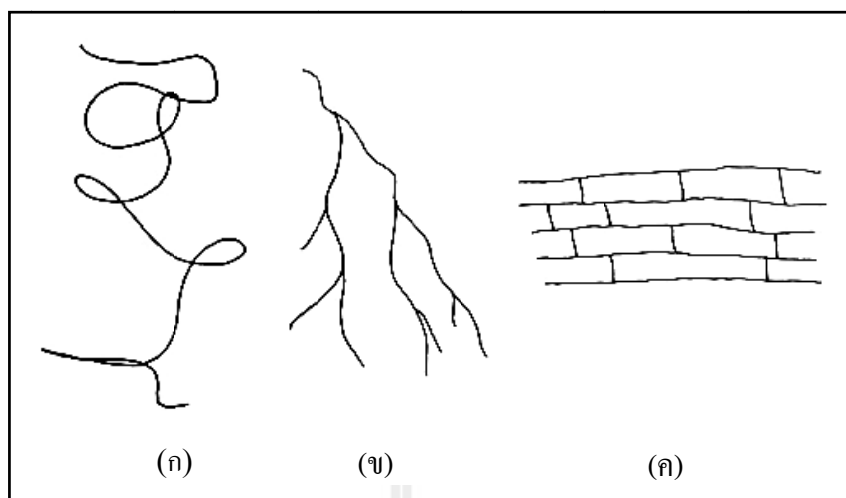
ในบทนี้จึงได้นำเสนอพื้นฐานของวัสดุพอลิเมอร์ คุณสมบัติโครงสร้าง และคุณสมบัติของ ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของวัสดุพอลิเมอร์ในแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังมุ่งเน้นในเรื่อง การทำวัสดุพอลิเมอร์ XLPE โดยการเชื่อมขวาง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการทำฉนวนเคเบิลอีกด้วย

### 3.2.1 การจำแนกประเภทของวัสดุพอลิเมอร์ตามลักษณะโครงสร้างโมเลกุล

วัสดุพอลิเมอร์สามารถจำแนกประเภทตามลักษณะโครงสร้าง ของสายโซ่โมเลกุล ได้เป็น 3 ประเภท คือ

- 1) โครงสร้างโมเลกุลแบบสายโซ่ตรง (Linear)
- 2) โครงสร้างโมเลกุลแบบกิ่ง (Branch)
- 3) โครงสร้างโมเลกุลแบบร่างแห (Cross-Linked Network)

โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของ พอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) และ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene: LDPE) เป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน แต่สังเคราะห์จากวิธีที่ต่างกันทำให้ HDPE เป็นสายโซ่โมเลกุลตรงยาวที่สามารถจัดเรียงตัวได้ดี จึงเกิดผลึกได้มากกว่าและมีความหนาแน่นสูงกว่า ส่งผลให้มีความแข็งแรงมากกว่า LDPE ที่มีลักษณะเป็นสายโซ่โมเลกุลแบบกิ่งจึงจัดเรียงตัวได้ยาก และมีความหนาแน่นน้อยกว่า เป็นต้น



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ (ก) โครงสร้างแบบสายโซ่ตรง (ข) โครงสร้างแบบกิ่ง (ค) โครงสร้างแบบร่างแห (ที่มา : <http://www.vcharkarn.com/lesson/view.php?id=1056>)

นอกจากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นวัสดุพอลิเมอร์ยังสามารถจำแนกประเภทตามสมบัติทางความร้อน หรือลักษณะการคงตัวหลังการขึ้นรูปได้ โดยทั่วไปโครงสร้างแบบสายโซ่ตรงและแบบกิ่งจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งมีสมบัติทางความร้อนที่สำคัญ คือ จะอ่อนตัวเมื่อให้ความร้อนจนหลอมและแข็งตัวเมื่อลดอุณหภูมิลง ดังนั้นเมื่อใช้พอลิเมอร์ประเภทนี้แล้วสามารถนำมาขึ้นรูปใหม่ได้อีก ด้วยกระบวนการรีไซเคิล โดยการรวบรวมพอลิเมอร์ใช้แล้วมาหลอมแล้วขึ้นรูปใหม่ เช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน และพอลิสไตรีน เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ เทอร์โมเซต (Thermoset) สามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นงานโดยกระบวนการเชื่อมขวาง (Crosslink) ทำให้ได้วัสดุที่เป็นโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลร่างแหที่มีจุดหลอมเหลวสูงมาก เมื่อให้ความร้อนจะไม่อ่อนตัว แต่จะคงรูปอยู่ หากให้ความร้อนสูงมากก็จะเกิดการสลายตัวแทนการหลอมเหลว จึงไม่สามารถนำมาหลอมเพื่อใช้ใหม่ได้หลังจากที่ขึ้นรูปแล้ว หรือไม่สามารถรีไซเคิลได้นั่นเอง ตัวอย่างเช่น ฟีนอลิก เรซิน (Phenolic Resin) เมลามีน (Melamine) และยางรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งได้จากกระบวนการเชื่อมขวางของพอลิไอโซพรีนหรือยางธรรมชาติกับสารประกอบกำมะถัน โดยกระบวนการนี้มีชื่อเรียกเฉพาะว่ากระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanization)

### 3.2.2 พอลิเมอร์สังเคราะห์

พอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic Polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่มนุษย์สร้างขึ้นจากการสังเคราะห์ด้วยปฏิกิริยาทางเคมี โดยในปี ค.ศ.1909 L. Baekeland นักเคมีชาวอเมริกันเชื้อสายเบลเยียมสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นได้เป็นครั้งแรก ค้นพบเบคเคลไลต์หรือฟีนอลิกเรซิน

(Bakelite or Phenolic Resin) จากการทดลองสังเคราะห์วัสดุฉนวนเพื่อใช้เคลือบสายไฟ เขาค้นพบว่าเมื่อผสมฟีนอล (Phenol) กับฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) เข้าด้วยกัน แล้วให้ความร้อนเพื่อกลั่นเอาน้ำออก โดยปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation Polymerization) จะได้สารเหนียวที่เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลงแล้วจะแข็งตัวเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างร่างแห (Network Structure) มีความแข็งแรงเป็นพิเศษ เหมาะสำหรับการใช้เป็นฉนวนหุ้มสายไฟ เครื่องโทรศัพท์ในยุคแรก ๆ แต่เนื่องจาก ฟีนอลิกเรซินมีสีที่ค่อนข้างเข้มจนถึงดำ การใช้งานเป็นวัสดุสีขาวงามทำได้ค่อนข้างยาก จึงไม่ได้รับความนิยมนัก ปัจจุบันจึงนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบผิวโต๊ะที่ต้องการความทนทานเป็นพิเศษทั้งต่อแรงขีดข่วน ความร้อน หรือสารเคมี เช่น โต๊ะปฏิบัติการเคมี ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สำคัญ ปีที่สังเคราะห์ได้ และตัวอย่างผลิตภัณฑ์ (บทความจากห้องเรียนออนไลน์ <http://school.scimath.org>, รศ.ดร.ปกรณ์ โอภาประกาศิต, 2554)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้

ปี ค.ศ.	ชื่อพอลิเมอร์	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์
1909	ฟีนอลิกเรซิน (Phenolic Resin)	ฉนวนหุ้มสายไฟ หูฟังโทรศัพท์
1927	พีวีซี (Polyvinyl chloride)	เสื้อกันฝน ท่อน้ำ
1936	อะคริลิก (Acrylic)	ตู้โชว์ ชั้นวางของโชว์
1938	ไนลอน (Polyamide)	เครื่องนุ่งห่ม เชือก
1938	พอลิสไตรีน (Polystyrene)	ภาชนะใส่อาหาร อุปกรณ์ครัว
1942	พอลิเอสเตอร์ (Polyesters)	ตัวถังเรือ พลาสติกย่อยสลายได้ วัสดุใช้แล้วทิ้ง
1942	พอลิเอทิลีน (Polyethylene)	ขวดน้ำ ถัง
1943	ซิลิโคน (Silicone)	น้ำยาฉนวนในมอเตอร์
1947	อีพ็อกซีเรซิน (Epoxy resin)	เครื่องมือ อุปกรณ์ที่ต้องการความทนทาน กาว
1954	พอลิยูรีเทน (Polyurethane)	โฟมกันกระแทก
1957	พอลิพรอพิลีน (Polypropylene)	หมวกเซฟตี้ ถัง
1957	พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)	ส่วนประกอบในเครื่องใช้ไฟฟ้า
1964	ไอออนอเมอร์ (Ionomer)	ลูกกอล์ฟ
1974	Aromatic polyester e.g. (PET)	ขวด PET
1985	พอลีคีโตน (Polyketone)	ส่วนประกอบในเครื่องยนต์
1985	Liquid crystalline polymers	จอแสดงผล LCD

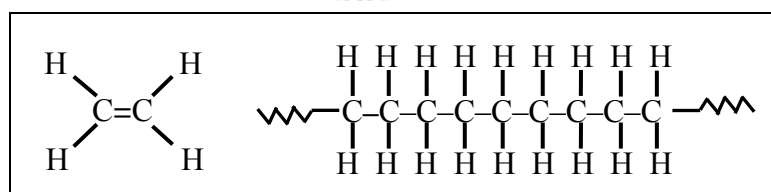
### 3.2.3 พอลิเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้รับความนิยมสูงมาตั้งแต่ช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 เนื่องจากมีเสถียรภาพ ผลิตง่าย เป็นฉนวนได้ดีและมีความทนทานในสภาวะใช้งานภายใต้อุณหภูมิปกติ ต่อมาในปี ค.ศ. 1933 พอลิเอทิลีนได้ถูกพัฒนาให้เป็นวัสดุพอลิเมอร์หลักในการทำเป็นฉนวนของสายเคเบิลสำหรับการใช้งานที่ความถี่สูง นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเอทิลีนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของสายโซ่โมเลกุล ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุล ขอบเขตความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์และโครงสร้างของผลึก (Crystal Structure) วัสดุพอลิเอทิลีนที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

- 1) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ
- 2) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง
- 3) พอลิเอทิลีนเชิงเส้นความหนาแน่นต่ำ

โดยพอลิเอทิลีนแต่ละประเภทจะถูกนำไปใช้งานแตกต่างกันไป ตามความเหมาะสมของงาน แต่พอลิเอทิลีนที่ถูกนำไปใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลอย่างกว้างขวาง และเป็นที่ยอมรับมากที่สุดคือ พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางหรือ XLPE

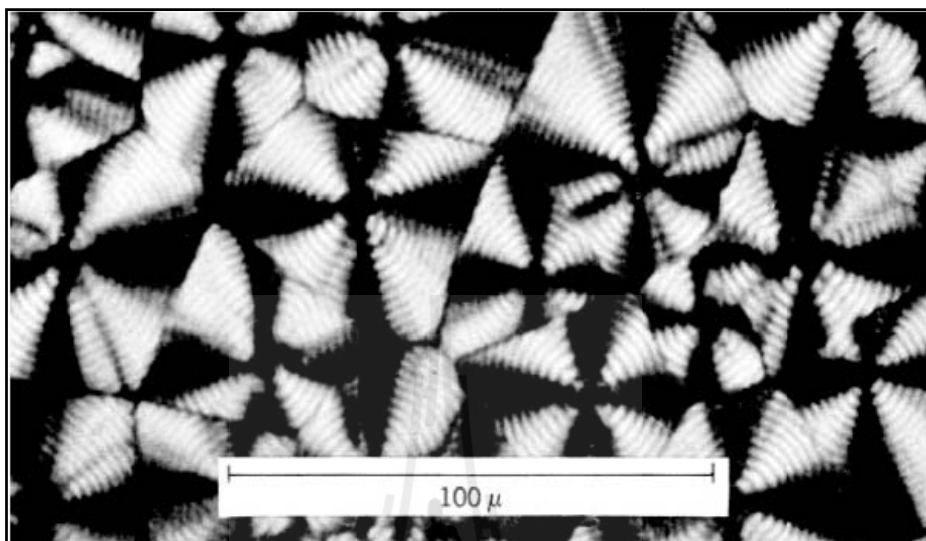
พื้นฐานทางโมเลกุลของพอลิเอทิลีนโดยปกติจะอยู่ในรูปของห่วงโซ่โมเลกุลที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ของคาร์บอน (Carbon) หนึ่งอะตอมและโมโนเมอร์ของไฮโดรเจนสองอะตอม (Hydrogen) เชื่อมต่อกันเป็นห่วงโซ่ยาวเกิดจากวัสดุประกอบเอทิลีนที่มีรูปแบบทางโมเลกุลคือ  $C_2H_4$  หรือ  $CH_2=CH_2$  โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ซึ่งเป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ขึ้นจากการรวมตัวกันของมอนอเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



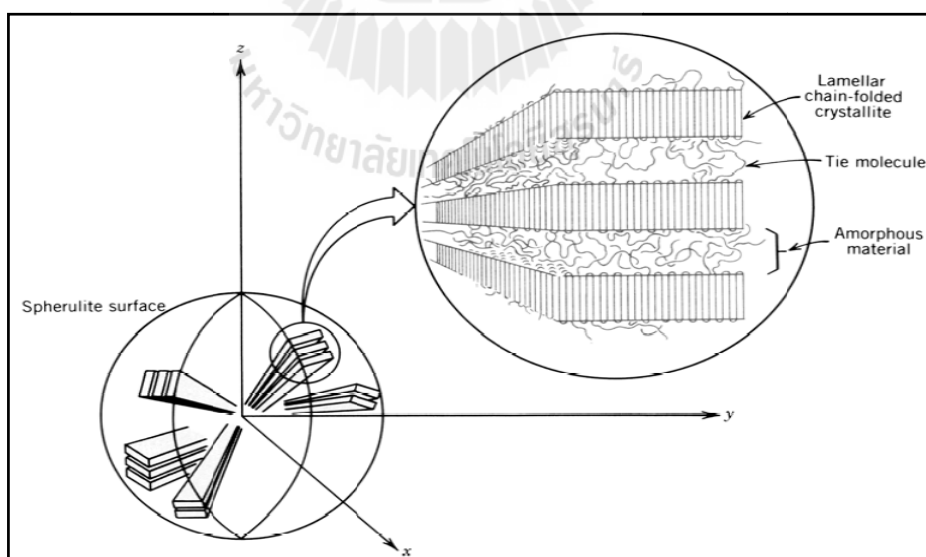
รูปที่ 3.2 โครงสร้างพอลิเอทิลีนจากเอทิลีน

พอลิเอทิลีนเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีข้อบกพร่องกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) และมีโครงสร้างแบบ Spherulite ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งแต่ละ Spherulite ประกอบด้วย Chain-folded Ribbon จำนวนมากหรือ Lamellar ที่แผ่ออกจากจุดกึ่งกลาง พื้นที่ส่วนอื่นนอกจากที่เป็น

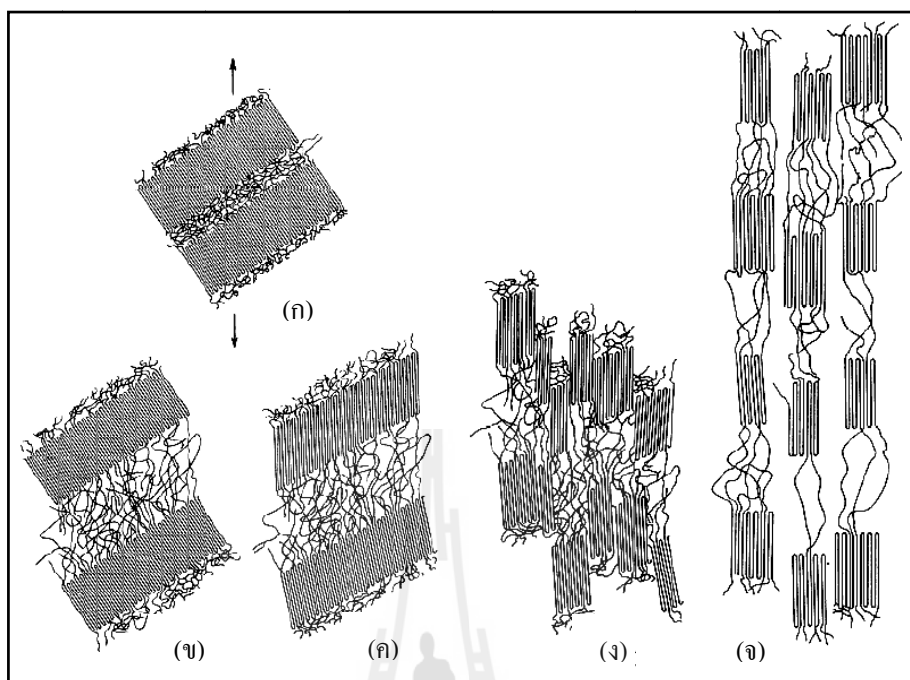
Lamellar เหล่านี้จะเป็นแบบอสัณฐานดังแสดงในรูปที่ 3.4 การจัดเรียง Lamellar จะเชื่อมด้วย Tie Chain ซึ่งผ่านตลอดบริเวณของอสัณฐานเหล่านั้น



รูปที่ 3.3 โครงสร้าง Spherulite ของพอลิเอทิลีน (ขยาย 525 เท่า) (ที่มา: คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงรายละเอียดของโครงสร้าง Spherulite (ที่มา: คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเสีรูปของวัสดุพอลิเมอร์แบบกิ่งผลึก (ที่มา: คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

กลไกการเสีรูปของพอลิเอทิลีน สามารถอธิบายได้ด้วยปฏิริยาระหว่างชั้นของ Lamellar กับบริเวณที่เป็นออสันฐาน กระบวนการนี้เกิดขึ้นหลายขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.5 ลักษณะ Chain-folded Lamellar สองชุดกับบริเวณออสันฐานที่อยู่ระหว่าง Lamellar ก่อนเสีรูปแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) เมื่อเริ่มเกิดการเสีรูปดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) Lamellar Ribbon จะเลื่อนผ่าน Ribbon อื่น ๆ เช่นเดียวกับ Tie Chain บริเวณออสันฐาน ทำให้เกิดการยึดออกจากกัน หลังจากนั้นจะเกิดการเสีรูปในขั้นที่สองด้วยการเอียงของ Lamellar ส่งผลให้ Fold Chain เกิดการเรียงตัวในแนวของแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ค) จากนั้นบริเวณของชุดผลึกจะแยกออกจาก Lamellar เป็นส่วน ๆ แต่ยังเชื่อมกันด้วย Tie chain ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ง) ในขั้นสุดท้ายดังแสดงในรูปที่ 3.5 (จ) ชุดผลึกและ Tie chain จะจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันกับแนวแรงดึง ดังนั้น การเสีรูปจากแรงดึงของ พอลิเมอร์กิ่งผลึกทำให้เกิดโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวสูง ซึ่งในระหว่างกระบวนการ Spherulite จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทรงคุณลักษณะทางกลของพอลิเอทิลีน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อกระบวนการถูกขวางไม่ให้เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยการเพิ่มระดับเชื่อมขวางให้แก่พอลิเอทิลีนกระบวนการดังกล่าวจะไปยับยั้งการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุลทำให้ พอลิเมอร์แข็งแรงมากขึ้น (คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ อรรถพล ตะระะ, 2551)



### 3.2.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

LDPE เป็นวัสดุที่นิยมถูกนำมาใช้งานในการทดสอบต่าง ๆ เนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีที่เรียบง่าย แต่ LDPE ยังคงเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งผลึก หรืออยู่ในรูปแบบของผลึกและภาคอสัณฐานปะปนกัน โดยมีโครงสร้างทางผลึกอยู่ที่ประมาณ 50–60% ซึ่งรูปแบบของผลึกและภาคอสัณฐานของ LDPE มีหน้าที่สนับสนุนให้ LDPE มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น แต่ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่สามารถหลอมโครงสร้างผลึกของ LDPE อยู่ที่ประมาณ 110°C และอุณหภูมิที่สามารถรับได้ในสภาวะการทำงานปกติอยู่ที่ประมาณ 70°C ทำให้ LDPE ยังไม่ดีที่สุดในการนำมาใช้เป็นฉนวนสายเคเบิล เนื่องจากทนความร้อนได้ต่ำเกินไป อย่างไรก็ตาม LDPE ยังเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ได้รับความนิยม เนื่องจากมีคุณสมบัติความเป็นผลึกต่ำ ซึ่งก่อให้เกิดความยืดหยุ่นและโปร่งใส เหมาะแก่การผลิตของใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ถัง และขวดพลาสติกต่าง ๆ เป็นต้น

### 3.2.5 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

HDPE มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่เป็นกิ่งสาขาน้อยจึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งแรงและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นลดลงจะทำให้ผิวแตกรานได้ง่าย ทนความร้อนได้ไม่มากนักแต่ทนสารเคมีได้ดีโดยทนความร้อนอุณหภูมิสูงถึง 110°C และ 120°C ได้ในช่วงสั้น ๆ และทนต่อสารเคมีมากกว่า LDPE ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่อากาศสามารถซึมผ่านได้ HDPE มีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว มีความเหนียวและยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ สามารถผสมให้มีสีต่าง ๆ ได้ HDPE เป็นวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกคือพลาสติกที่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้

### 3.2.6 พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง

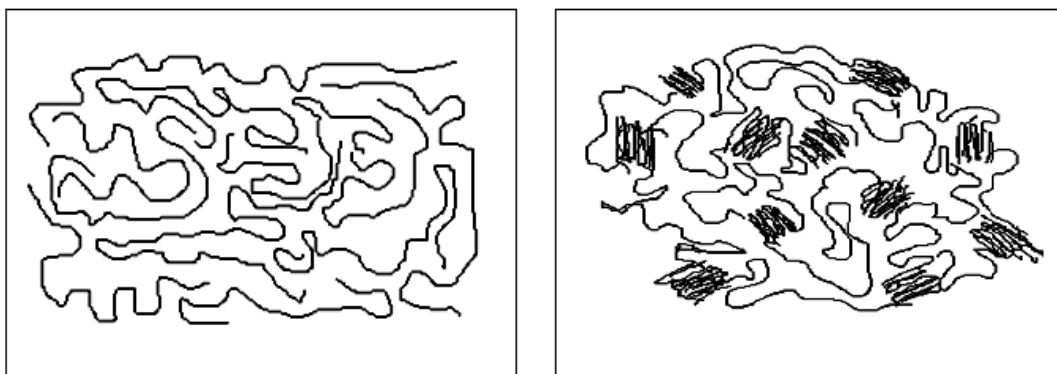
XLPE เป็นพอลิเอทิลีนที่มีการเชื่อมขวางระหว่างพันธะโมเลกุลเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดียิ่งขึ้น XLPE เริ่มใช้ในช่วงปี ค.ศ. 1990 และเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่นิยมใช้สำหรับฉนวนเคเบิล เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือได้ในการใช้งาน มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การเป็นฉนวนไฟฟ้า เช่น มีค่าความสูญเสียความเป็นฉนวนต่ำและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ฉนวน XLPE เป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งผลึกหรืออยู่ในรูปแบบของผลึกและอสัณฐานปะปนกัน โดยมีโครงสร้างทางผลึกอยู่ที่ประมาณ 40%

### 3.3 คุณสมบัติของพอลิเมอร์

คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุพอลิเมอร์มีพารามิเตอร์หลายอย่างเช่นเดียวกับวัสดุโลหะ ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเสนอคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้เท่านั้น โดยประกอบไปด้วย คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางกลต่าง ๆ การเสถียรของวัสดุพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (Semi Crystalline) อุณหภูมิการหลอมกับการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยี่ห้อขึ้นปรากฏการณ์การเกิดผลึก การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อนของวัสดุพอลิเมอร์ อธิบายได้ดังนี้

#### 3.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิเมอร์

สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลที่ส่งผลถึงปริมาณของผลึก (Crystallinity) และความหนาแน่นของวัสดุ ดังเช่นกรณีของ HDPE และ LDPE โดยทั่วไปพอลิเมอร์ถูกจำแนกเป็น 2 ประเภทตามปริมาณผลึก คือ พอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semi-Crystalline Polymer) มีปริมาณผลึกจำนวนหนึ่ง และพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous Polymer) ซึ่งไม่มีผลึกเลย ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เนื่องจากพอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นสายโซ่โมเลกุลยาวที่ซับซ้อนจึงไม่สามารถเกิดผลึกได้ 100% เหมือนกับสารโมเลกุลเล็กอื่น ๆ นอกจากนี้แล้ว พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันต่างกัน จะส่งผลต่อชนิดของแรงระหว่างสายโซ่โมเลกุล (Intermolecular Forces) เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van De Val) แรงคู่ขั้ว (Dipole) หรือแรงพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonding) ซึ่งขนาดของแรงเหล่านี้มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์โดยตรง น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) ของพอลิเมอร์ก็เป็นปัจจัยหลักที่มีผลโดยตรงต่อสมบัติการละลาย สมบัติทางความร้อน เช่น อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (Glass Transition Temperature:  $T_g$ ) จุดหลอมเหลว และสมบัติเชิงกล เป็นต้น นอกจากนี้ การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล (Molecular Orientation) ก็ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพโดยตรงอีกด้วย เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นสายโซ่โมเลกุลที่ขดไปมา เมื่อทำการดึงขึ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ก็จะทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการยืดตัวไปในทิศทางเดียวกัน (Uniaxial Orientation) เกิดการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นตัวอย่างพอลิเมอร์ในทิศทางการดึงดีขึ้น นิยมใช้ในการเตรียมเส้นใยหรือฟิล์มที่ต้องการเพิ่มความต้านทานแรงดึง หรือการเตรียมถุงพลาสติก เป็นต้น



รูปที่ 3.6 ลักษณะ โครงสร้างของพอลิเมอร์แบบอสัณฐาน และแบบกึ่งผลึก  
(ที่มา: <http://www.vcharkarn.com/varticle/18774/6>)

#### คุณสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์

คุณลักษณะทางความร้อนที่สำคัญของพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางคือ ไม่ละลายจนกลายเป็นของเหลวหนืดเมื่อได้รับความร้อนที่สูงกว่าอุณหภูมิการละลายของผลึก โดยปกติพอลิเอทิลีนเมื่อได้รับความร้อนสูงขึ้นผลึกที่จับกันทำให้วัสดุอยู่ในสถานะของแข็งจะหลอมละลายทำให้วัสดุกลายเป็นของเหลวหนืด ส่วนในกรณีของพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางเมื่อผลึกหลอมละลาย แต่จุดที่เชื่อมขวางยังคงอยู่ ดังนั้นเมื่อพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางหลอมเหลวทำให้วัสดุมีความอ่อนนุ่มลงแต่จะไม่ละลายเป็นของเหลว คุณลักษณะนี้เป็นสิ่งสำคัญในการใช้พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางสำหรับสายเคเบิลฉนวน คือสามารถทนความร้อนสูงชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ดี (Handbook of polymer, Andrew J. Peacock, 2000)

#### คุณสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเอทิลีน

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของพอลิเอทิลีนบริสุทธิ์เนื่องจากพอลิเอทิลีนเชื่อมต่อกันด้วยอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนซึ่งไม่มีอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงทำให้พอลิเอทิลีนมีความเป็นฉนวนได้ดีเยี่ยม พอลิเอทิลีนนิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวางสำหรับเป็นฉนวนสายภาคแรงต่ำใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในครัวเรือน ไปจนถึงการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงจากที่หนึ่งไปอีกยังที่หนึ่ง แม้ว่าพอลิเอทิลีนจะมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนที่ดีแต่เมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่งภายใต้อิทธิพลของไฟฟ้าแรงสูง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายและสนามไฟฟ้าร่อนรอยของโมเลกุลที่มีข้อบกพร่องเป็นต้น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มคาร์บอนิลและกลุ่มไวนิลส่งผลให้พอลิเอทิลีนค่อย ๆ เสื่อมลงทั้งด้านเคมีและทางกายภาพ ลดประสิทธิภาพของการเป็นฉนวนลง (Handbook of polymer, Andrew J. Peacock, 2000)

### 3.3.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์

สมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ ประกอบไปด้วย โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงอัด และความแข็งแรงการล้า โดยค่าพารามิเตอร์ทางกลต่าง ๆ เหล่านี้สามารถหาค่าด้วยการทดสอบแรงเค้นความเครียด คุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะไวมากต่ออัตราการเสียรูป อุณหภูมิและธรรมชาติทางเคมีของสิ่งแวดล้อม เช่น ในสภาวะที่มีน้ำ ออกซิเจน ตัวทำละลายอินทรีย์ เป็นต้น บางครั้งในการทดสอบวัสดุพอลิเมอร์ จำเป็นต้องดัดแปลงเทคนิคการทดสอบ รวมทั้งรูปทรงของชิ้นงานทดสอบที่ใช้ทดสอบวัสดุโลหะ โดยเฉพาะวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น ยาง เป็นต้น

นอกจากนี้คุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิห้องมากกว่าโลหะอย่างมาก เมื่อพิจารณาพฤติกรรมแรงเค้นความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์บางชนิด พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นวัสดุจะมีโมดูลัสความยืดหยุ่นและความแข็งแรงดึงลดลง แต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของอัตราความเครียดมีความสำคัญต่อพฤติกรรมทางกลของพอลิเมอร์ ซึ่งปกติการลดอัตราการเสียรูป มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมแรงเค้นความเครียด เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ส่งผลให้วัสดุจะอ่อนตัวและเหนียวขึ้น

ความสามารถในการจัดการสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความเข้าใจถึงกลไกการเกิดการเสียรูปของวัสดุ โดยในที่นี้จะได้กล่าวถึงรูปแบบการเสียรูปของวัสดุพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก ซึ่งมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของวัสดุ คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์

วัสดุ	ความ ถ่วงจำเพาะ	โมดูลัส แรงดึง (Gpa (ksi))	ความทน แรงดึง (MPa (ksi))	ความคงทน แรงคราก (MPa (ksi))	ความยืด ขณะ แตกหัก (%)
พอลิเอทิลีนความ หนาแน่นต่ำ	0.917- 0.932	0.17-0.28 (25-41)	8.3-31.4 (1.2-4.55)	9.0-14.5 (1.3-2.1)	100-650
พอลิเอทิลีนความ หนาแน่นสูง	0.952- 0.965	1.06-1.09 (155-158)	22.1-31.0 (3.2-4.5)	26.2-33.1 (3.8-4.8)	10-1200
พีวีซี	1.30-1.58	2.4-4.1 (350-600)	40.7-51.7 (5.9-7.5)	40.7-44.8 (5.9-6.5)	40-80

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลที่อุณหภูมิห้องของวัสดุพอลิเมอร์ (ต่อ)

วัสดุ	ความ ถ่วงจำเพาะ	มอดุลัส แรงดึง (Gpa (ksi))	ความทน แรงดึง (MPa (ksi))	ความคงทน แรงคราก (MPa (ksi))	ความยืด ชนะ แตกหัก (%)
พอลิเทระฟลูออ- โรเอทิลีน (PTFE)	2.14-2.20	0.40-0.55 (58-80)	20.7-34.5 (3.0-5.0)	—	200-400
พอลิพรอพิลีน	0.90-0.91	1.14-1.55 (165-225)	31-41.4 (4.5-6.0)	31.0-37.2 (4.5-5.4)	100-600
พอลิสไตรีน	1.04-1.05	2.28-3.28 (330-475)	35.9-51.7 (5.2-7.5)	—	1.2-2.5
PMMA	1.17-1.20	2.24-3.24 (325-470)	48.3-72.4 (7.0-10.5)	53.8-73.1 (7.8-10.6)	2.0-5.5
ฟีนอล ฟอร์มาลดีไฮด์	1.24-1.32	2.76-4.83 (400-700)	34.5-62.1 (5.0-9.0)	—	1.5-2.0
ไนลอน 6.6	1.13-1.15	1.58-3.80 (230-550)	75.9-94.5 (11.0-13.7)	44.8-82.8 (6.5-12)	15-300
พอลิเอสเตอร์ (PET)	1.29-1.40	2.8-4.1 (400-600)	48.3-72.4 (7.0-10.5)	59.3 (8.6)	30-300
พอลิคาร์บอเนต	1.20	2.38 (345)	62.8-72.4 (9.1-10.5)	62.1 (9.0)	110-150

### 3.3.3 ปฏิกิริยาการเกิดผลึก การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อน

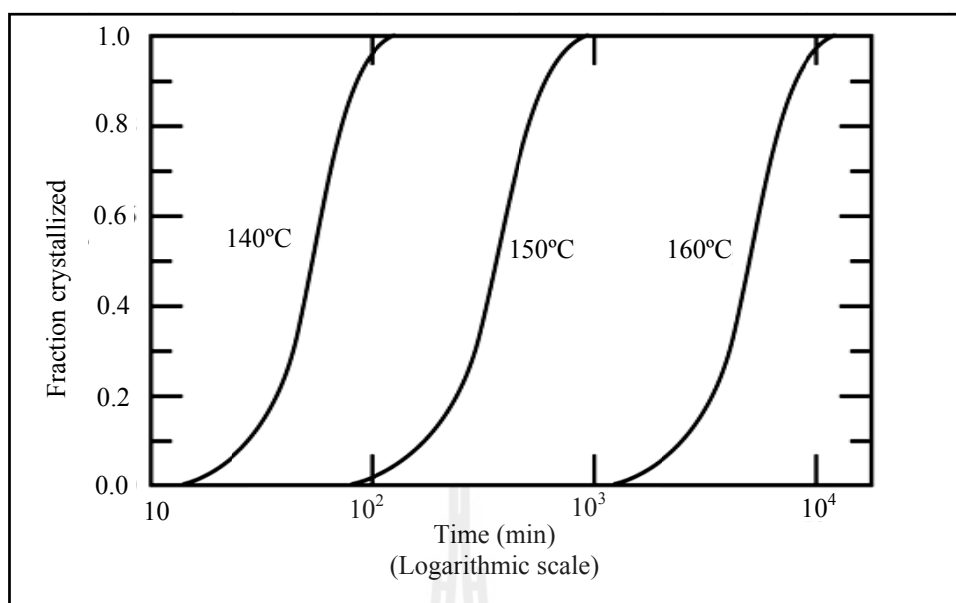
สมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิอย่างมาก โดยคุณสมบัติทางความร้อนและทางกลของวัสดุ เริ่มด้วยปรากฏการณ์การเกิดผลึก การหลอม และการอ่อนตัวจากความร้อน การเกิดผลึกเป็นกระบวนการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของวัฏภาคของแข็งที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการเย็นตัวจากของหลอมเหลวที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่เป็นระเบียบ และการหลอมตัวจะเกิดขึ้นอีกครั้งเมื่อวัสดุพอลิเมอร์ได้รับความร้อน ส่วนการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่นจะเกิดขึ้นกับวัสดุพอลิเมอร์แบบอสัณฐานหรือพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นผลึก และเมื่อเย็นตัวจากของหลอมเหลวจะเกิดเป็นของแข็งรีจิด (Rigid Solid) ซึ่งจะคงโครงสร้างโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบเช่นเดียวกันกับของหลอมเหลว และในบางครั้งถือเป็นของเหลวแช่แข็ง

อุณหภูมิ โดยสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ จะเปลี่ยนไปตามการเกิดผลึก การหลอมและการอ่อนตัว จากความร้อน ยิ่งกว่านั้นวัสดุพอลิเมอร์ทั้งผลึกบริเวณที่เป็นผลึกจะเกิดการหลอมตัว และการเกิดผลึก ในขณะที่บริเวณที่ไม่เป็นผลึกจะผ่านช่วงอุณหภูมิของการอ่อนตัวจากความร้อน

1) การเกิดผลึก (Crystallization) เป็นการเข้าใจถึงกลไกและอัตราการเกิดผลึกของพอลิเมอร์เป็นสิ่งสำคัญมากเช่นเดียวกันกับอิทธิพลของระดับการเกิดผลึกต่อสมบัติทางกลและทางความร้อนของวัสดุ การเกิดผลึกของพอลิเมอร์หลอมเหลวเกิดขึ้นโดยจุดเริ่มเกิดผลึก (Nucleation) และขยายตัวด้วยกระบวนการเติบโต (Growth Process) กล่าวคือเมื่อวัสดุพอลิเมอร์เย็นตัวผ่านอุณหภูมิการหลอมเหลวจะมีจุดเริ่มเกิดผลึกเป็นบริเวณเล็ก ๆ จากนั้นโมเลกุลที่ไม่เป็นระเบียบจะเริ่มจัดเรียงทิศทางในรูปของชั้น Chain-folded ที่อุณหภูมิเกินอุณหภูมิหลอมเหลวจุดเริ่มเกิดผลึกจะไม่เสถียร เนื่องจากการสั่นสะเทือนของอะตอมจากความร้อนจะทำลายการจัดเรียงโมเลกุลให้เป็นระเบียบ เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเกิดจุดเริ่มเกิดผลึก

การเกิดผลึกต้องอาศัยเวลาในแบบเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็ง (Solid-state Transformation) ซึ่งสามารถศึกษาได้โดยการนำเศษส่วนการเกิดผลึกมาพล็อตกราฟเทียบกับค่าล็อกของเวลาที่อุณหภูมิคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเกิดผลึกโดยที่  $y$  เป็นฟังก์ชันของเวลา  $t$

โดยปกติปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้นจะวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของชิ้นทดสอบ เนื่องจากวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคของผลึกมีปริมาตรแตกต่างกัน ส่วนอัตราการเกิดผลึกจะวัดตรงจุดที่มีการเกิดผลึก 50% และอัตราการเกิดผลึกนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเกิดผลึก แสดงให้เห็นว่า น้ำหนักโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์จะแปรผกผันกับอัตราการเกิดผลึก กล่าวคือถ้าอัตราการเกิดผลึกต่ำจะได้น้ำหนักโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์มากตามไปด้วย



รูปที่ 3.7 อัตราส่วนผลึกกับแกนเวลาของวัสดุพอลิพรอพิลีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ  
(ที่มา: คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

2) การหลอมเหลว (Melting) การหลอมเหลวของผลึกวัสดุพอลิเมอร์จะเป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงสถานะจากวัสดุของแข็งที่มีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่จัดเรียงตัวเป็นระเบียบไปเป็นของไหลหนืด (Viscous Liquid) ที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเหนืออุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting Temperature :  $T_m$ ) การหลอมเหลวของพอลิเมอร์มีหลายแบบแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างโมเลกุลของวัสดุพอลิเมอร์กับลักษณะโครงสร้างผลึก Lamellar ซึ่งจะไม่เหมือนกับกรณีของโลหะและเซรามิกที่มีรูปแบบการหลอมเหลวที่แน่นอนกว่า และนอกจากนั้นพฤติกรรมของการหลอมเหลวของวัสดุพอลิเมอร์ยังขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ กล่าวคือถ้าเพิ่มอัตราการให้ความร้อน อุณหภูมิการหลอมเหลวของวัสดุพอลิเมอร์จะสูงขึ้น วัสดุพอลิเมอร์จะตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและสมบัติของวัสดุ กล่าวคือการอบอ่อน (Annealing) ซึ่งเป็นการให้ความร้อนกับวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการหลอมเหลว อาจเพิ่มความหนาของชั้น Lamellar ได้ ดังนั้นการอบอ่อนวัสดุพอลิเมอร์อาจทำให้อุณหภูมิการหลอมเหลวเพิ่มขึ้นได้

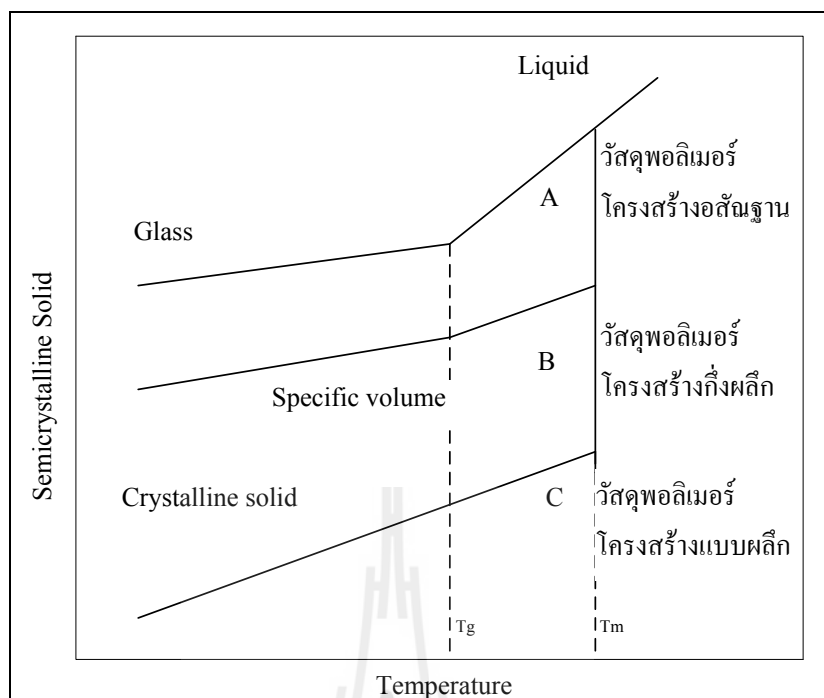
3) การเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น (Glass Transition) การเปลี่ยนสภาพนี้จะเกิดในวัสดุพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐานที่เกิดจากการเย็นตัวจากสถานะของเหลวเป็นของแข็งโดยไม่เกิดเป็นผลึก นั่นคือช่วงการเย็นตัวของสายโซ่โมเลกุล ซึ่งไม่สามารถจัดเรียงตัวเป็นระเบียบในลักษณะสามมิติ โดยการเปลี่ยนแปลงสภาพในช่วงแรกของการเย็นตัวความหนืดจะเพิ่มขึ้น จากนั้น

จะค่อย ๆ เปลี่ยนจากของเหลวเป็นวัสดุคล้ายยางและกลายเป็นของแข็งในที่สุด อุณหภูมิที่พอลิเมอร์เปลี่ยนสภาพจากยืดหยุ่นคล้ายยางเป็นของแข็ง เรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น ( $T_g$ ) ในทางกลับกันเมื่อวัสดุพอลิเมอร์ได้รับความร้อนเกินอุณหภูมิ  $T_g$  จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากของแข็งกลับไปเป็นยืดหยุ่น ยิ่งกว่านั้นกรณีวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถเป็นผลึกก็อาจเกิดเป็นของแข็งออสถฐานได้ ถ้าได้รับการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากสถานะของเหลว

4) อุณหภูมิการหลอมในการเปลี่ยนสภาพคล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น อุณหภูมิการหลอมเหลวกับการเปลี่ยนสภาพนี้เป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดการใช้งานของวัสดุพอลิเมอร์ โดยนิยามอุณหภูมิทั้งสองข้างต้นเป็นขีดจำกัดอุณหภูมิบนและล่างตามลำดับ ในการนำวัสดุไปใช้งาน โดยเฉพาะวัสดุพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก และยังมีอิทธิพลต่อกระบวนการขึ้นรูปของวัสดุพอลิเมอร์ และวัสดุประกอบพอลิเมอร์ (Polymer-matrix Composite) อีกด้วย

อุณหภูมิการหลอมเหลวและการเปลี่ยนสภาพของวัสดุพอลิเมอร์จะวัดโดยกรรมวิธีแบบเดียวกันกับวัสดุเซรามิก ด้วยการพล็อตปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume) เป็นส่วนกลับของความหนาแน่นเทียบกับอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยกำหนดให้ A และ C เป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดอสถฐานและผลึก ตามลำดับ สำหรับวัสดุผลึกมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะแบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิหลอมเหลว  $T_m$  ส่วนกราฟวัสดุอสถฐานจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง แต่มีการลดลงของความชันเล็กน้อยที่อุณหภูมิ  $T_g$  สำหรับพอลิเมอร์กึ่งผลึกจะพบทั้งพฤติกรรมการหลอมเหลว  $T_m$  และการเปลี่ยนสภาพ  $T_g$  ซึ่งเป็นสมบัติของวัฏภาคผลึกและอสถฐานตามลำดับ ทั้งนี้พฤติกรรมที่แสดงในรูปที่ 3.8 จะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวหรืออัตราการให้ความร้อน ค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวและการเปลี่ยนสภาพของวัสดุพอลิเมอร์บางชนิดแสดงในตารางที่ 3.3 และคุณลักษณะของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับเป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.4





รูปที่ 3.8 ปริมาตรจำเพาะของวัสดุพอลิเมอร์ต่ออุณหภูมิ (ที่มา: คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ  $T_g$  และ  $T_m$  ของวัสดุพอลิเมอร์ (คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ, อรรถพล ตะระะ, 2551)

วัสดุพอลิเมอร์	อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพ คล้ายแก้วเป็นยืดหยุ่น ( $^{\circ}\text{C}$ )	อุณหภูมิการหลอม ( $^{\circ}\text{C}$ )
XLPE	-125	110
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	-110	115
พอลิเททระฟลูออโรเอทิลีน	-97	327
พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	-90	137
พอลิพรอพิลีน	-18	175
ไนลอน 6.6	57	265
พอลิเอสเตอร์ (PET)	69	265
พีวีซี	87	212
พอลิสไตรีน	100	240

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า

(Electric Cables Handbook, 3<sup>rd</sup> edition, G.F. Moore, 1997)

วัสดุ	XLPE	PE	PVC	ยาง Butyl	ยาง EP	ยาง CR
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	0.92	0.92	12.-1.5	1.4-1.5	1.3-1.4	1.4-1.6
ความคงทนฉนวนไฟฟ้า (Dielectric Strength : kV/mm)	50	30-50	20-35	20-30	30-45	15-25
ค่าความต้านทานปริมาตร (Volume Resistivity : ohm)	1,018	1,018	1,012	1,015	1,015	107-12
ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant)	2.3	2.3	5-9	4-5	4-5	7-10
ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor : %)	0.03	0.03	4-12	1-3	1-2	> 10
ความต้านทานแรงดึง (Tensile Strength : kg/mm <sup>2</sup> )	1.4- 1.8	1.2- 1.5	1.0-2.5	0.4-0.7	0.4-0.9	1.2-2.0
อุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งาน (°C)	90	75	60-75	80	90	75
ความต้านทานไฟ (Flame Resistivity)	NG	NG	E	NG	NG	E
การเปลี่ยนรูปจากความร้อน (Heat Deformation)	F	G	G	G	F	G
ค่าความต้านทานโอโซน (Ozone Resistivity)	F	F	G	F	E	G
ความคงทนต่อสภาพอากาศ (Weather Proof)	G	G	F	F	F	F
ค่าความต้านทานน้ำมัน (Oil Resistivity)	E	E	F	NG	NG	G

หมายเหตุ : E : ขอดเยี่ยม

F : ดี

G : พอใช้

NG : ไม่เหมาะแก่การใช้งาน

### 3.4 สายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง

ปัจจุบันการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในด้วยระบบสายเคเบิลใต้ดินเป็นที่นิยมและแพร่หลายไปทั่วโลก อาจกล่าวได้ว่าสายเคเบิลใต้ดินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอย่างยิ่งต่อระบบไฟฟ้ากำลัง ในช่วง 2 ศตวรรษที่ผ่านมา มีนักวิจัยเป็นจำนวนมากได้ค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสายเคเบิลให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งทางด้านการประยุกต์ใช้งาน การพัฒนาเทคโนโลยีต่าง ๆ ในการผลิตสายเคเบิล การเลือกเฟ้นวัสดุพอลิเมอร์มาเป็นฉนวนในสายเคเบิล และการออกแบบสายเคเบิล เป็นต้น รายละเอียดต่าง ๆ ของสายเคเบิลจะกล่าวถึงในลำดับถัดไป

#### 3.4.1 วิวัฒนาการของสายเคเบิล

ในช่วงทศวรรษปี ค.ศ. 1830 เริ่มมีการคิดค้นเทคโนโลยีสายเคเบิลครั้งแรก และอีก 50 ปีต่อมาในปี ค.ศ. 1880 จึงมีการติดตั้งสายเคเบิลใต้ดินแห่งแรกในกรุงเบอร์ลินสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน เหตุที่ต้องทิ้งระยะห่างถึง 50 ปีก็เพราะนักวิจัยทำการเลือกเฟ้นวัสดุฉนวนที่สามารถทนต่อความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวนำไฟฟ้า อีกทั้งยังมีความคงทนต่อสนามไฟฟ้าสูง และเป็นความสำเร็จของ Ferranti's ในปี ค.ศ. 1880 ในการคิดค้นและประดิษฐ์ฉนวนแบบหลายชั้นโดยใช้เทปกระดาษพันซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุฉนวนได้เป็นอย่างดี เทคโนโลยีนี้ได้รับการปรับปรุงอีกครั้งในปี ค.ศ. 1917 โดย Emanueli ได้นำฉนวนกระดาษมาจุ่มน้ำมันฉนวนที่มีค่าความหนืดต่ำ การปรับปรุงครั้งนี้ช่วยให้เสถียรภาพการทนต่อความร้อนของสายเคเบิลมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีความเป็นไปได้ที่จะใช้สายเคเบิลแรงดันสูงกว่า 100 kV เป็นครั้งแรก การพัฒนาครั้งสำคัญอีกครั้งของเทคโนโลยีสายเคเบิลเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1963 ด้วยการใช่วัสดุพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางเป็นฉนวนทำให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (90°C) การออกแบบพื้นฐานของสายเคเบิลระบบแรงดันสูง (High Voltage: HV) และแรงดันสูงพิเศษ (Extra High Voltage: EHV) ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่ผ่านมา องค์ประกอบหลักของสายเคเบิลได้แก่ ตัวนำ ฉนวน และชั้นกำบังทำจากโลหะ (Electric Cables Handbook, 3<sup>rd</sup> edition, G.F. Moore, 1997)

ในช่วงศตวรรษที่ผ่านมา พัฒนาการของฉนวนในสายเคเบิลมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว โดยการเปลี่ยนจากการใช้ฉนวนด้วยพลาสติกหุ้มตะกั่ว และกระดาษจุ่มน้ำมัน เป็นการใช่วัสดุ พอลิเมอร์เป็นฉนวนแทน สาเหตุหลักที่ใช่วัสดุพอลิเมอร์มาเป็นฉนวนแทนที่กระดาษจุ่มน้ำมันและพลาสติกหุ้มตะกั่วคือ วัสดุพอลิเมอร์มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลงต่อการบำรุงรักษาและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กระดาษจุ่มน้ำมันและพลาสติกหุ้มตะกั่ว อีกทั้งยังมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนมากกว่ากระดาษจุ่มน้ำมันและพลาสติกหุ้มตะกั่ว วิวัฒนาการและพัฒนาการของสายเคเบิลแสดงในตารางที่ 3.5

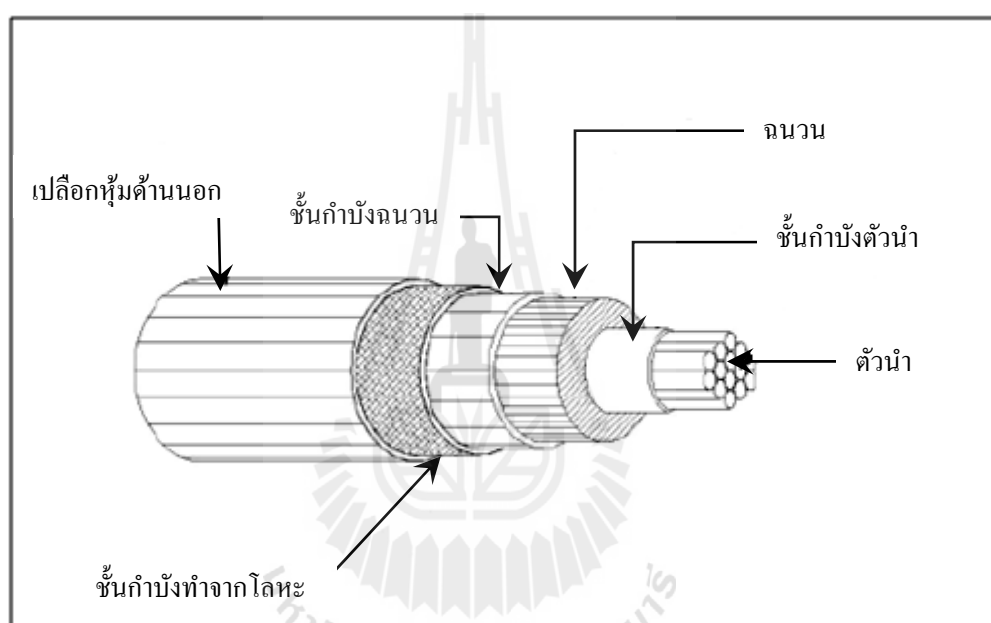
ตารางที่ 3.5 วิวัฒนาการและพัฒนาการของสายเคเบิล (Electric Cables Handbook, 3<sup>rd</sup> edition, G.F. Moore, 1997)

ปี	พัฒนาการของสายเคเบิล
1812	เริ่มมีการใช้สายไฟหุ้มฉนวนด้วยยางเคลือบเงา ใช้สำหรับการจุดระเบิดในเหมือง เป็นครั้งแรกในรัสเซีย
1850	เริ่มมีการใช้สายเคเบิลโทรเลขใต้ทะเลระหว่างอังกฤษและฝรั่งเศส และใช้ในเรือดำน้ำ เป็นครั้งแรก
1880	Thomas Edison ได้ประดิษฐ์สายเคเบิลกระแสตรงโดยมีฉนวนหุ้มขึ้นในอเมริกา
1890	Sebastian Ferranti ได้เสนอแนวทางการใช้สายเคเบิล 10 kV ในรูปแบบท่อ โดยมี กระจายเป็นฉนวนในอังกฤษ
1900	มีการใช้ยางธรรมชาติเป็นฉนวนในสายเคเบิล
1925	เริ่มมีการใช้สายเคเบิลกระจายอัดความดันเป็นครั้งแรก
1930	เริ่มมีการใช้ผลิตภัณฑ์พีวีซี (Polyvinyl Chloride :PVC) เป็นครั้งแรกในเยอรมัน
1937	ได้มีการคิดค้นวัสดุพอลิเมอร์พอลิเอทิลีน (PE) ขึ้นในประเทศอังกฤษ
1942	เริ่มมีการประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเอทิลีนในสายเคเบิลเป็นครั้งแรก
1954	เริ่มมีการใช้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเป็นครั้งแรกในสวีเดน
1963	บริษัท General Electric ได้ทำการประดิษฐ์วัสดุพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) ขึ้น
1968	เริ่มมีการใช้สายเคเบิล XLPE ในระบบแรงดันสูงขนาดกลางเป็นฉนวนเป็นครั้งแรก
1972	นำเสนอการใช้ตัวกำบังแบบสารกึ่งตัวนำในสายเคเบิล
1978	มีการใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นปลอกหุ้มสายเคเบิลอย่างแพร่หลายในอเมริกาเหนือ
1988	เริ่มมีการประยุกต์ใช้สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขนาด 500 kV เป็นครั้งแรกใน ญี่ปุ่น
2000	เริ่มมีการประยุกต์ใช้สายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE ขนาด 500 kV โดยติดตั้งใต้ดิน ในระยะทางไกลเป็นครั้งแรกในญี่ปุ่น
2006	ออสเตรเลียได้มีการสร้างสายเคเบิลใต้น้ำที่มีความยาวที่สุดในโลก

### 3.5 โครงสร้างและวัสดุของสายเคเบิล

การออกแบบสายเคเบิลส่วนใหญ่ เป็นการออกแบบเพื่อง่ายต่อการใช้งาน และมีการรับประกันสายเคเบิลที่ออกแบบ เพื่อให้สายเคเบิลที่ผลิตขึ้นมามีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นวัสดุทุกชนิดภายในสายเคเบิลจึงต้องมีการตรวจสอบ และกลั่นกรองความน่าเชื่อถือในประสิทธิภาพการทำงาน โครงสร้างโดยทั่วไปของสายเคเบิลประกอบด้วย ตัวนำไฟฟ้า ฉนวนพอลิเมอร์ ปกคลุม และชั้นกำบังภายนอกและภายในของฉนวนดังแสดงใน

รูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบของสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์

#### 3.5.1 วัสดุตัวนำไฟฟ้า

ในปัจจุบัน ทองแดงและอะลูมิเนียมถูกใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิลกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งการเลือกใช้มีเงื่อนไขแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยและความสะดวกของแต่ละพื้นที่ แต่ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาวัสดุอะลูมิเนียมถูกใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีการผลิตที่ง่าย แต่อย่างไรก็ตามเหตุผลหลักที่อะลูมิเนียมถูกใช้อย่างแพร่หลายมากกว่าทองแดงคือ ราคาของทองแดงปรับตัวสูงขึ้นมากกว่าวัสดุอะลูมิเนียมค่อนข้างมาก แม้ว่าอะลูมิเนียมจะมีความนิยมนำไปใช้เป็นตัวนำไฟฟ้ามากกว่าวัสดุอื่น ๆ แต่คุณสมบัติ ข้อดีและข้อเสียของวัสดุก็มีความแตกต่างกันไป การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้าแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.7 แสดงถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะที่ใช้มาผลิตเป็นตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิล ถ้าพิจารณาถึงราคาของวัสดุแล้วทองแดงและอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตเป็นตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิลแต่ก็ยังมียูบียงที่ใช้โซเดียมเป็นตัวนำไฟฟ้า

คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะที่นำมาทำเป็นตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิลและชั้นกำบังแสดงไว้ในตารางที่ 3.8 ทองแดงทนความร้อนได้ดี จึงสามารถนำไฟฟ้าใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงได้อย่างต่อเนื่อง อะลูมิเนียมแกนเดียวทนสภาวะได้ต่ำกว่าทองแดงแตเมื่อนำมาตีเกลียวจะสามารถทนสภาวะได้สูงขึ้น

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำตัวนำไฟฟ้า

วัสดุ	ข้อดี	ข้อเสีย
อะลูมิเนียม	มีราคาไม่แพง	นำไฟฟ้าและทนความร้อนได้น้อย
ทองแดง	นำไฟฟ้าได้ดี และทนความร้อนสูง	มีราคาแพง
เงิน	นำไฟฟ้าและทนต่อความร้อนได้ดีกว่าทองแดง	มีราคาแพงมาก
โซเดียม	มีราคาถูกมาก	ความปลอดภัยด้านการใช้งาน การบำรุงรักษาดำและนำไฟฟ้าต่ำ

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ

ชนิดของโลหะ	ความนำไฟฟ้า (ทองแดง = 100%)	ค่าความต้านทาน ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 20°C ( $\Omega m, 10^{-8}$ )	ค่าสัมประสิทธิ์ ความต้านทาน อุณหภูมิ (per °C)
เงิน	106	1.626	0.0041
ทองแดง(ขึ้นรูปแบบรีดอบ)	100	1.724	0.0039
ทองแดง(ขึ้นรูปแบบรีดแข็ง)	97	1.777	0.0039
ทองแดงชุบ	95-99	1.741-1.814	0.0039
อะลูมิเนียม(เกรดอ่อน)	61	2.803	0.0040
อะลูมิเนียม(เกรดแข็ง)	61	2.826	0.0040
โซเดียม	35	4.926	0.0054
เหล็กเหนียว	12	13.80	0.0045

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะที่ใช้ในการทำสายเคเบิล

คุณสมบัติ	หน่วย	ทองแดง	อะลูมิเนียม	ตะกั่ว
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 20°C	kg/m <sup>3</sup>	8890	2703	11370
ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวทางความร้อนต่อ °C	×10 <sup>-6</sup>	17	23	29
จุดหลอมเหลว	°C	1083	659	327
การนำความร้อน	W/cm °C	3.8	2.4	0.34
ความเครียดแรงดึงสูงสุด	MN/m <sup>2</sup>	225	70-90	-
ความแข็ง	DPHN	50	20-25	5
ความคงทนความล้า (ค่าประมาณ)	MN/m <sup>2</sup>	±65	±40	±28

ตัวนำไฟฟ้าในสายเคเบิลสามารถเป็นอะลูมิเนียมหรือทองแดงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการใช้งาน อะลูมิเนียมและทองแดงสามารถเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ทั้งแบบแท่งหรือแบบสายตีเกลียว ตัวนำไฟฟ้าแบบสายตีเกลียวถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นให้แก่สายเคเบิลและสามารถเพิ่มค่าความคงทนความเครียดทางไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 20% ปัญหาสำคัญของตัวนำไฟฟ้าคือความชื้นที่เกิดจากน้ำในสถานะแวดล้อม ซึ่งน้ำสามารถซึมผ่านเข้าตัวนำไฟฟ้าได้อย่างง่ายดาย โดยแทรกซึมผ่านทางช่องว่างระหว่างเกลียวสาย การป้องกันน้ำซึมผ่านตัวนำไฟฟ้าแบบสายตีเกลียวสามารถทำได้โดยการเติมพลาสติกผสมลงในช่องว่างระหว่างสายตีเกลียวหรือนำสารดูดซึมน้ำ (Hygroscopic) ไว้ภายในสายตีเกลียว วิธีป้องกันอื่น ๆ ที่สามารถป้องกันการซึมของน้ำได้ คือการใช้สารตัวนำแบบแท่งซึ่งไม่มีช่องว่างระหว่างเกลียวทำให้น้ำไม่สามารถไหลซึมผ่านได้

ในมาตรฐาน AWG (American Wire Gauge) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ตัวนำไฟฟ้าทองแดงแบบแท่งถูกใช้ในขนาดที่ไม่เกิน No.1 AWG และไม่นิยมใช้ตัวนำไฟฟ้าอะลูมิเนียมแบบแท่ง แต่มาตรฐานในยุโรปนิยมใช้ตัวนำไฟฟ้าอะลูมิเนียมเป็นแบบแท่ง ในแกนของสายเคเบิลแรงสูงสามารถมีตัวนำไฟฟ้าได้มากกว่า 1 ชนิด แต่จำเป็นต้องคำนวณระยะห่างระหว่างตัวนำไฟฟ้าในแต่ละชนิดได้อย่างเหมาะสม เพื่อคำนึงถึงความสัมพันธ์ทางความเครียดทางไฟฟ้า การสร้างรูปแบบของ

ตัวนำไฟฟ้ามีกระบวนการหลายวิธี เช่น การบีบอัด การหลอม การทอ การถลุง การชุบ และการตีเกลียว เป็นต้น

### 3.5.2 วัสดุฉนวน

สายเคเบิลแรงสูงส่วนใหญ่มักถูกเรียกชื่อตามวัสดุฉนวนที่ใช้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญอย่างยิ่งของวัสดุฉนวน โดยหน้าที่หลักของฉนวนคือการป้องกันกระแสไฟฟ้าจากตัวนำ เพื่อไม่ให้กระแสไฟฟ้าสัมผัสกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ภายในโครงสร้างของสายเคเบิล อันทำให้เกิดการลัดวงจรได้ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์สำหรับใช้เป็นฉนวนจำนวนมาก ส่งผลให้ฉนวนพอลิเมอร์สามารถทำหน้าที่ความเป็นฉนวนได้ดีกว่าฉนวนในสมัยก่อน โดยฉนวนแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามความเหมาะสมของสภาพงาน ฉนวนที่ใช้ในสายเคเบิลส่วนใหญ่มีดังนี้

1) ฉนวนกระดาษ โดยในอดีตการติดตั้งสายเคเบิลแรงสูงที่ใช้ในระบบแรงดันสูง กระแสตรงส่วนใหญ่มักใช้ฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน ฉนวนชนิดนี้มีการใช้งานเป็นที่น่าพอใจที่ทุกระดับแรงดัน สาเหตุหลักในการเสื่อมอายุของฉนวนชนิดนี้คือ การเกิดรอยแตกร้าวหรือการสึกกร่อนที่ปลอกหุ้ม ซึ่งทำให้ความชื้นผ่านเข้ามายังเนื้อฉนวน เป็นต้นเหตุให้ฉนวนเสื่อมอายุ ปัจจุบันความนิยมในการใช้งานฉนวนกระดาษลดน้อยลง เนื่องจากการใช้ฉนวนกระดาษมีผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม เพราะวัสดุที่ใช้เป็นปลอกหุ้มและจุ่มในน้ำมัน

2) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) หรือฉนวนพีวีซี ถูกผลิตขึ้นครั้งแรกที่ประเทศเยอรมัน ในปี ค.ศ. 1930 ต่อมาในปี ค.ศ. 1960 ฉนวนพีวีซี เริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและเริ่มเข้ามาแทนที่ฉนวนยางและฉนวนกระดาษจุ่มน้ำมัน สาเหตุที่ฉนวนพีวีซี มีความนิยมเพราะฉนวนชนิดนี้ไม่มีผลกระทบในเรื่องความชื้น มีน้ำหนักเบา เหนียว และมีความต้านทานทางปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้เปลือกหุ้มโลหะคลุมเนื้อฉนวน นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งที่ง่าย ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว จึงทำให้โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นำฉนวนพีวีซีมาใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันฉนวนพีวีซีถูกใช้ในกรณีที่สายเคเบิลที่มีพิกัดแรงดันน้อยกว่า 1 kV เท่านั้น

3) พอลิเอทิลีน (PE) ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1930 และได้ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนในปี ค.ศ. 1943 เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่ายและมีราคาถูก ฉนวน PE จึงได้รับความนิยมเป็นอย่างยิ่ง มีการใช้งานอย่างกว้างขวางและเริ่มใช้งานแทนที่ฉนวนอื่น ๆ นอกจากนี้ฉนวน PE ยังมีคุณสมบัติในด้านความทนทาน มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี ด้านทานความชื้นในระดับหนึ่ง และทนทานต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้อย่างดี ถึงแม้ว่าฉนวน PE จะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฉนวนอื่น ๆ แต่ฉนวน PE ก็มีข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่ฉนวนชนิดอื่นไม่มีเช่นกัน นั่นคือการเกิดปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำ เนื่องจากความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าทำให้เกิดการกัดกร่อนจากการดิสชาร์จบางส่วนและส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของฉนวนลดต่ำลง แต่ข้อเสียที่สำคัญที่สุดของ



ฉนวน PE คือมีการทำงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่  $70^{\circ}\text{C}$  ซึ่งฉนวนกระด้างจุ่มน้ำมันมีการทำงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงสุดที่  $80-90^{\circ}\text{C}$  เมื่อกลุ่มนักวิจัยได้เห็นข้อบกพร่องของฉนวน PE จึงได้ทำการแก้ไขปัญหาคือข้อบกพร่องอย่างทันที โดยการปรับปรุงโครงสร้างโมเลกุลของ PE ให้ทนความร้อนได้สูงขึ้น และมีการระบายความร้อนได้ดีกว่าฉนวนกระด้างจุ่มน้ำมัน โดยสามารถทนความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น  $90^{\circ}\text{C}$  ในสภาวะปกติ ในสภาวะฉุกเฉินสามารถทนได้  $130^{\circ}\text{C}$  และการเกิดลัดวงจรสามารถทนได้ถึง  $250^{\circ}\text{C}$  นอกจากนี้การเกิดโครงสร้างแบบร่างแหยังช่วยเพิ่มค่าความคงทนทางกลจากแรงกระแทก เพิ่มการคงสภาพเชิงขนาด (Dimensional Stability) เพิ่มความยืดหยุ่นเพิ่มเสถียรภาพทางเคมี และยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ตลอดจนเพิ่มอายุการใช้งานของ PE

4) พอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวาง (XLPE) ถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1963 โดยนักวิจัยกลุ่มหนึ่งในนิวยอร์ก (Precopio and Gilbet, 1963) ในช่วงปี ค.ศ. 1970 ประเทศทางยุโรปและที่อื่น ๆ ได้เริ่มนำวัสดุ XLPE มาใช้เป็นฉนวนสายเคเบิลอย่างแพร่หลาย วัสดุ XLPE เป็นวัสดุฉนวนที่ทนความร้อนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากการนำวัสดุพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มาเป็นพื้นฐานของเนื้อฉนวน และผสมเข้ากับสารเติมแต่งอื่น ๆ ที่ทำให้มีคุณสมบัติขึ้น วัสดุประกอบเหล่านี้ประกอบด้วย วัสดุที่มีความต้านทานต่อการเกิดปรากฏการณ์ทรานซ์จันท์จากน้ำ และวัสดุที่ป้องกันการเกิดออกซิเดชันลงในเนื้อฉนวน XLPE นอกจากนี้ยังมีการผสมวัสดุประกอบอื่น ๆ เช่น สารประกอบที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางหรือเรียกว่าสารประกอบขึ้นรูป ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ และน้ำ ผู้ผลิตสายเคเบิลส่วนใหญ่มักใช้สารประกอบเหล่านี้ผสมเพิ่มลงในเนื้อฉนวน PE ก่อนทำการเชื่อมขวางให้เป็น XLPE เมื่อผ่านกระบวนการเหล่านี้เสร็จสิ้นแล้ว จะได้ฉนวน XLPE ที่ทนต่อความร้อนสูงมีคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าที่ดี จากการพัฒนาคุณสมบัติต่าง ๆ ทำให้ฉนวน XLPE สามารถใช้เป็นฉนวนในสายเคเบิลที่ใช้กับระบบแรงดันสูงถึง 500 kV กระบวนการเชื่อมขวางของวัสดุ PE สามารถทำได้ 3 วิธีคือ เชื่อมขวางจากการฉายแสง (Irradiation-Crosslink) ทำให้เกิดโครงสร้างเชื่อมขวางด้วยเปอร์ออกไซด์ (Peroxide-Crosslink) และเชื่อมขวางด้วยซิลเลน (Silane-Crosslink) โดยวิธีเหล่านี้จะถูกใช้ตามความเหมาะสมของสายเคเบิลที่ใช้ในระบบแรงดันขนาดต่าง ๆ ในการผลิตสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงฉนวน XLPE ต้องพยายามไม่ให้มีข้อบกพร่องต่าง ๆ เกิดขึ้นบนสายเคเบิล เช่น การเกิดโพรงช่องว่างในเนื้อฉนวนหรือที่พื้นผิวฉนวน และความผิดปกติอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่ไม่เหมาะสม ในการผลิตฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้าต้องทำให้เป็นสารเนื้อเดียวกัน แปรรูปให้มีขนาดเล็กและมีสิ่งเจือปนให้น้อยที่สุดเพื่อการป้องกันการเกิดลัดวงจรบางส่วนในฉนวน

### 3.5.3 วัสดุกำบังแบบสารกึ่งตัวนำ

ในโครงสร้างของสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE จะประกอบด้วยแผ่นกำบังแบบสารกึ่งตัวนำ (Semi Conducting Screens : SC) ซึ่งอยู่ระหว่างด้านนอกและด้านในของเนื้อฉนวน XLPE แผ่นกำบังฉนวนด้านในจะอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้าและฉนวน ส่วนแผ่นกั้นด้านนอกจะอยู่ระหว่างฉนวนและเปลือกหุ้ม ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการเกิดดีสชาร์จบางส่วนบริเวณพื้นผิวระหว่างฉนวนกับตัวนำไฟฟ้าและระหว่างฉนวนกับชั้นป้องกันภายนอก ตัวกำบังแบบสารกึ่งตัวนำยังช่วยให้สนามไฟฟ้ารอบฉนวนของสายเคเบิลสม่ำเสมอด้วยการลดเกรเดียนต์ศักย์ไฟฟ้า (Potential Gradient) เหนือสายตัวนำไฟฟ้าดีเกลือและภายในตัวกำบังโลหะ นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเกิดโคโรนา (Corona) บนผิวของตัวนำไฟฟ้าดีเกลือโดยใช้วิธีให้ฉนวนระหว่างชั้นนอกและชั้นในติดกันมากที่สุด อีกทั้งยังสามารถป้องกันอันตรายจากการลัดวงจรอันมีสาเหตุมาจากความร้อนของตัวนำไฟฟ้า แผ่นกำบังแบบสารกึ่งตัวนำผลิตจากสาร Carbon Black ซึ่งผ่านการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ความเข้มข้นของสาร Carbon Black จากแผ่นกำบัง ที่ใช้สำหรับกำบังตัวนำไฟฟ้ากับฉนวนจะมีความเข้มข้นอยู่ที่ 30–40% ในกรณีที่แผ่นกำบังฉนวนสร้างจากสาร Carbon Black ที่มีความเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้คุณสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าของแผ่นกำบังฉนวนลดลง ดังนั้นจึงควรผสม Carbon Black ลงในฉนวนที่ค่าระหว่าง 10–100  $\Omega \cdot \text{cm}$  และไม่ควรเกิน 104  $\Omega \cdot \text{cm}$

### 3.5.4 เปลือกหุ้ม

เปลือกหุ้ม (Cover) สามารถใช้ PVC หรือ PE แล้วแต่ลักษณะของการใช้งาน ในกรณีที่เป็นการใช้งานกลางแจ้งมักใช้เปลือกหุ้มพอลิไวนิลคลอไรด์ เพราะเมื่อเกิดการติดไฟ ในขณะที่เปลือกหุ้มพอลิเอทิลีนมักใช้ในงานเดินลอย เนื่องจากทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้ดี เปลือกหุ้ม พอลิเอทิลีนสามารถใช้ได้ทั้งเดินลอยในอากาศและฝังดิน แต่ส่วนใหญ่นิยมใช้ฝังใต้ดิน เนื่องจากมีความแข็งแรงและสามารถทนต่อความชื้นได้ดี สายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ใช้ในไฟฟ้าแรงสูงแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 สายเคเบิลแรงดันสูงฉนวน XLPE (ที่มา <http://www.tradeindia.com/fp140373/High-Tension-XLPE-Cables.html>)

### 3.6 กระบวนการผลิตสายเคเบิลฉนวน XLPE

การผลิตสายเคเบิลแรงสูงประกอบไปด้วยขั้นตอนมากมาย ความซับซ้อนของขั้นตอนการผลิตขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน และชนิดของสายเคเบิลที่ทำการผลิต เช่น สายเคเบิลที่ใช้ฝังใต้ดินหรือสายเคเบิลใต้น้ำ โดยประเภทของสายเคเบิลแรงสูงสามารถแบ่งอย่างกว้าง ๆ ออกเป็น 4 ประเภทตามฉนวนที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 ประเภทของฉนวนสายเคเบิลใต้ดิน

ประเภทของฉนวนในสายเคเบิล	คุณลักษณะ
ฉนวนพอลิเมอร์ (Polymeric insulation)	มี LDPE, HDPE, XLPE และ EPR เป็นฉนวน
ฉนวนเทปกระดาษหุ้มในฉนวนเหลว (Paper Tape form Self-Contained Fluid-Fill Insulation)	มีแผ่นกระดาษหรือแผ่นพรีพรีสพันหุ้มห่อในของเหลวย่อยสลายได้ (เช่น น้ำมันยาง) เป็นฉนวน
กระดาษหุ้มน้ำมันฉนวน (Mass-impregnated Non-draining Insulation : MIND)	เป็นฉนวนกระดาษหุ้มกับสารประกอบ MIND (พอลิบูทีน มีความหนืดต่ำ) ซึ่งจะไม่ไหลออกมาขณะเกิดความร้อน
ฉนวนแก๊สหรือของเหลวความดันสูง (High Pressured Fluid/gas Insulation)	เป็นฉนวนกระดาษที่ทำการหุ้มโดยของเหลวหรือเป็นฉนวนแก๊ส (SF <sub>6</sub> ) ซึ่งทำการติดตั้งด้วยท่อความดัน

เนื้อหาในบทนี้จะมุ่งเน้นในส่วนของการผลิตสายเคเบิลที่มีฉนวนพอลิเอทิลีนแบบเชื่อมขวางเท่านั้น เนื่องจากในปัจจุบัน ฉนวน XLPE มีความนิยมอย่างมาก และใช้ทำเป็นฉนวนในสายเคเบิลมากที่สุด

การผลิตสายเคเบิลฉนวนโดยการขึ้นรูปแบบอัดรีดจะไม่สามารถมองเห็นกระบวนการขึ้นรูปและการเชื่อมขวางภายในท่อ ดังนั้นคุณภาพของสายเคเบิลที่ถูกผลิตขึ้นส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับชนิดและสภาพของโรงงานผลิตสายเคเบิล โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับระบบคุณภาพในโรงงานผลิตสายเคเบิล ข้อกำหนดที่สำคัญของการผลิตสายเคเบิลคือ

- 1) โรงงานผลิตสายเคเบิลได้รับการออกแบบตามมาตรฐาน
- 2) การควบคุมกระบวนการที่แม่นยำและสามารถคาดการณ์ได้
- 3) การตรวจสอบวัสดุฉนวนที่จะเข้ามาในกระบวนการผลิตเป็นประจำ
- 4) ทำการสุ่มตัดเนื้อฉนวนนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์เป็นประจำ
- 5) การเข้มงวดในการทดสอบสายเคเบิลด้วยแรงดันสูงเป็นประจำ
- 6) ทำการทดสอบแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนและเก็บสถิติตามเวลา
- 7) ได้รับการรับรองคุณภาพของสายเคเบิลที่ผลิตได้

การผลิตสายเคเบิลฉนวน XLPE มี 5 ขั้นตอนหลักด้วยกันคือเตรียมความพร้อมของฉนวนและทำการคัดกรองสารแปลกปลอม การอัดขึ้นรูปของฉนวนและขึ้นก้าง ให้ความร้อนแก่สายเคเบิลเพื่อเริ่มกระบวนการเชื่อมขวางของฉนวนพอลิเมอร์ ทำการหล่อเย็นเพื่อให้อุณหภูมิของสายเคเบิลใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อมและทำการกำจัดสารประกอบที่ไม่จำเป็นออกจากฉนวนเคเบิล (Degassing)

การคัดกรองสารแปลกปลอมในวัสดุฉนวนให้อยู่ในระดับการปนเปื้อนต่ำที่สุดเป็นสิ่งที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง ดังนั้นวัสดุฉนวนจะถูกอัดผ่านกรวยและหัวอัดในระบบท่อที่ปิดสนิท สำหรับสายเคเบิลที่ใช้กับแรงดันต่ำความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ คุณภาพของวัสดุก่อนนำมาอัดขึ้นรูปเป็นฉนวนจะอยู่ในขั้น “Superclean” และ “Supersmooth” สำหรับวัสดุที่นำมาทำเป็นชั้นก้างฉนวน วัสดุจะถูกขนส่งมาที่โรงผลิตสายภายใต้การบรรจุในห้องปลอดเชื้อก่อนจะเข้าสู่กระบวนการอัดขึ้นรูปของสายเคเบิล สำหรับสายเคเบิลที่ใช้ในแรงดันสูงมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะต้องใช้วัสดุที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุดในการผลิตฉนวนสายเคเบิล โดยทั้งวัสดุที่นำมาทำเป็นฉนวนและวัสดุที่เป็นตัวนำจะต้องผ่านมาตรฐานและทำการคัดกรองฉนวนก่อนจะทำการเชื่อมขวาง หลังจากกรองแล้ว วัสดุต้องเก็บรักษาอยู่ในระบบปิด การขนส่งต้องเชื่อมต่อการเตรียมขึ้นรูปในรูปแบบระบบปิด การผลิตสายเคเบิลที่ดีโรงงานรีดตัวนำและโรงงานขึ้นรูปฉนวนควรอยู่ติดกัน ไม่ว่าจะเป็น

สายเคเบิลแรงดันต่ำหรือสายเคเบิลแรงดันสูงต้องตรวจสอบวัสดุและกระบวนการขึ้นรูปอย่างละเอียด เพื่อคุณภาพที่ดีของสายเคเบิลฉนวน

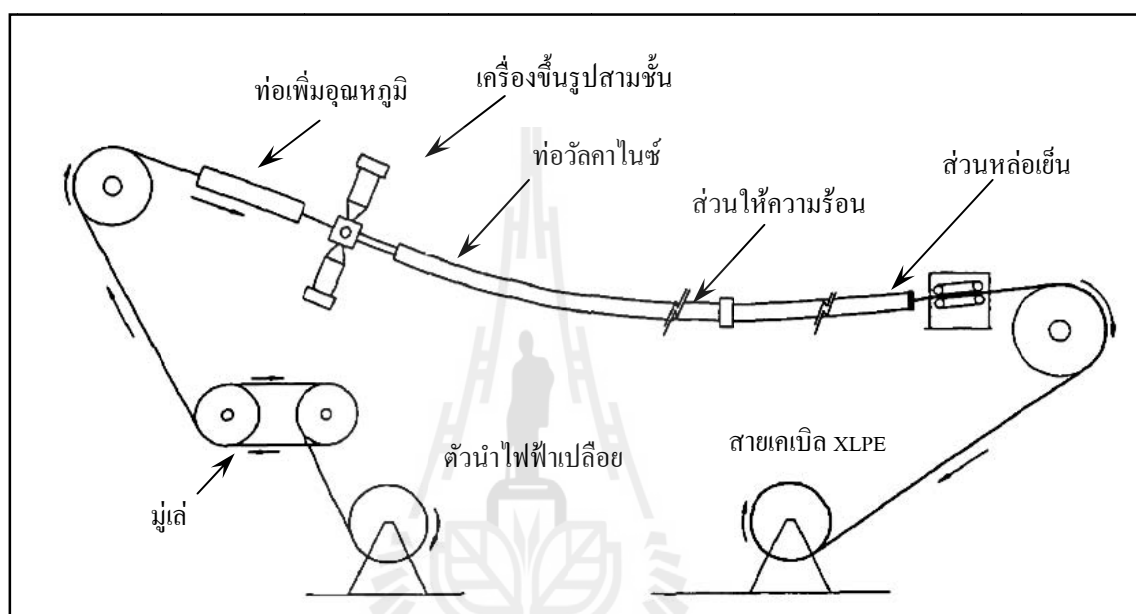
การผลิตสายเคเบิลแบบขึ้นรูปสามชั้นในขั้นตอนเดียว เริ่มต้นจากการนำเม็ดพอลิเมอร์และสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าเข้าสู่ช่องใส่สารลำเลียงของเครื่องอัด สารที่ถูกลำเลียงมาในช่องดังกล่าวจะถูกหลอมละลายและบีบอัดด้วยสกรูหมุนวนที่มีความร้อนสูง จนกระทั่งสารที่ถูกลำเลียงมาหลอมละลายจนหมด แล้วจึงถูกบีบอัดเข้าสู่ท่อของเครื่องอัดขึ้นรูป สิ่งแปลกปลอมหรือสิ่งเจือปนที่มากับวัสดุที่ถูกหลอมละลาย จะถูกคัดแยกออกโดยเครื่องกรองซึ่งอยู่ปลายสุดของท่อนี้ก่อนจะถึงหัวอัด จากนั้นตัวนำที่ถูกดึงผ่านหัวรีดลดขนาดจนได้ขนาดตามที่ออกแบบไว้จะถูกดึงผ่านเครื่องขึ้นรูปสามชั้น เครื่องขึ้นรูปจะฉีดสารกึ่งตัวนำหุ้มตัวนำซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นกักบังตัวนำจากนั้นฉนวนจะถูกฉีดหุ้มชั้นกักบังหุ้มตัวนำและสุดท้ายเครื่องขึ้นรูปสามชั้นจะฉีดสารกึ่งตัวนำหุ้มฉนวนอีกชั้นหนึ่งเป็นอันเสร็จขั้นตอนการขึ้นรูปสามชั้น

กระบวนการเชื่อมขวาง โดยหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการขึ้นรูปแล้วจะได้สายเคเบิลที่มีแกนกลาง 3 ชั้น วัสดุพอลิเมอร์ที่อยู่ในสายเคเบิลยังคงอยู่ในรูปของเทอร์โมพลาสติกซึ่งเป็นพลาสติกที่ทนความร้อนได้ต่ำเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ทนความร้อนได้สูง จึงต้องมีกระบวนการในการเปลี่ยนคุณสมบัติจากเทอร์โมพลาสติกให้เป็นเทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ โดยใช้กระบวนการวัลคาไนซ์และกระบวนการอบ (Curing) เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวาง โดยมีไดคัมมิลเปอร์ออกไซด์เป็นสารเชื่อมขวาง กระบวนการเชื่อมขวางต้องให้ความร้อนที่สูงกว่า 200 °C ในการเชื่อมขวางครั้งแรกใช้ไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อน ซึ่งส่งผลเสียต่อฉนวนคือทำให้ฉนวนมีความชื้นสะสมมาก ต่อมาได้ทำการพัฒนาการให้ความร้อนในการเชื่อมขวางเป็นแบบการอบแห้ง ซึ่งส่งผลดีต่อฉนวน กระบวนการอบแห้งเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการเปลี่ยนแปลงวัสดุพอลิเมอร์ให้กลายเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพในการทนความร้อนสูง กระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

### 3.6.1 กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแนวระนาบ

กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแนวระนาบ (Catenary Continuous Vulcanization: CCV) เป็นกระบวนการนำสายเคเบิลฉนวน PE ที่ยังไม่ทำการเชื่อมขวาง จากกระบวนการขึ้นรูป 3 ชั้น ลำเลียงผ่านท่อที่ยึดติดกับส่วนหัวของเครื่องอัดขึ้นรูป เพื่อเริ่มกระบวนการอบด้วยท่อลำเลียงในแนวระนาบ โดยใช้แก๊สไนโตรเจนความดันประมาณ 8 บาร์ (การอบแห้ง) หรือใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 300°C ส่งผ่านท่อลำเลียงสายเคเบิล เมื่อกระบวนการอบด้วยความร้อนให้แก่สายเคเบิลเสร็จสิ้น ท่อลำเลียงจะส่งสายเคเบิลเข้าสู่กระบวนการหล่อเย็น เพื่อลดอุณหภูมิจากการอบของกระบวนการเชื่อมขวางดังแสดงในรูปที่ 3.11

กระบวนการวัลคาไนซ์แบบต่อเนื่องแนวระนาบมีข้อดีคือ สามารถผลิตได้ในปริมาณมากและรวดเร็วเนื่องจากการติดตั้งในแนวราบ แต่ก็มีข้อจำกัดในด้านพิกัดกำลังของสายที่ผลิตได้เนื่องจากกระบวนการวัลคาไนซ์แบบต่อเนื่องแนวระนาบนี้สามารถผลิตสายเคเบิลได้สูงสุดที่พิกัดแรงดัน 150 kV สำหรับสายเคเบิลที่พิกัดกำลังสูงกว่านี้จะทำการผลิตโดยใช้กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวดิ่ง

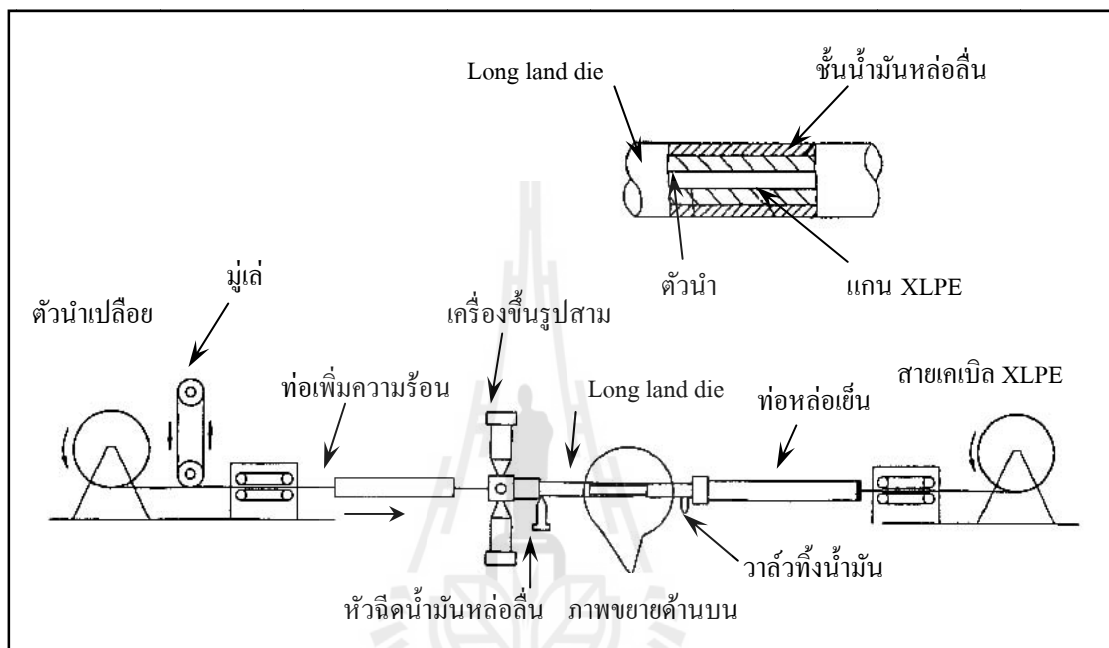


รูปที่ 3.11 แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ CCV

### 3.6.2 กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบ Mitsubishi – Dainichi

กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบ Mitsubishi – Dainichi (Mitsubishi Dainichi Continuous Vulcanisation : MDCV) เป็นระบบที่รู้จักกันดีในชื่อของกระบวนการ Long Land Die ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มบริษัท Mitsubishi และบริษัท Dainichi ในปี ค.ศ. 1970 กระบวนการนี้มีเครื่องอัดรีดขนาดเล็กและวางอยู่ในแนวนอนดังแสดงในที่ 3.12 กระบวนการนี้จะกระทำผ่านท่อลำเลียงสายเคเบิล โดยมีความร้อนอยู่ภายในตัวท่อจากการอัดรีดของหัวอัดรีด ซึ่งการอบจะให้ความร้อนผ่านท่อลำเลียงอุณหภูมิประมาณ  $200^{\circ}\text{C}$  ทำให้ประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการให้ความร้อนโดยใช้ไนโตรเจนหรือไอน้ำ และเพื่อลดแรงเสียดทานภายในท่อจะทำการฉีดน้ำมันหล่อลื่นพิเศษหลังจากหัวอัดรีด หลังจากกระบวนการเชื่อมขวางสายเคเบิลจะถูกหล่อเย็นด้วยน้ำในระบบหมุนเวียน โดยทั่วไประบบนี้ใช้ในการผลิต สายเคเบิลแรงสูง (High Voltage Cables) และแรงสูงพิเศษ

(Extra High Voltage Cables) ปัญหาที่พบในการใช้ระบบวัลคาไนซ์ในแนวนอนคือ การตกท้องข้างของตัวนำในฉนวน ดังนั้นการผลิตสายเคเบิลที่มีพื้นที่หน้าตัดมากจึงต้องเลือกวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูง อย่างไรก็ตาม ไม่สามารถผลิตสายเคเบิลที่มีขนาดใหญ่ พื้นที่หน้าตัดของตัวนำมากกว่า  $1600 \text{ mm}^2$  ได้



รูปที่ 3.12 แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ MDCV

### 3.6.3 กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวตั้ง

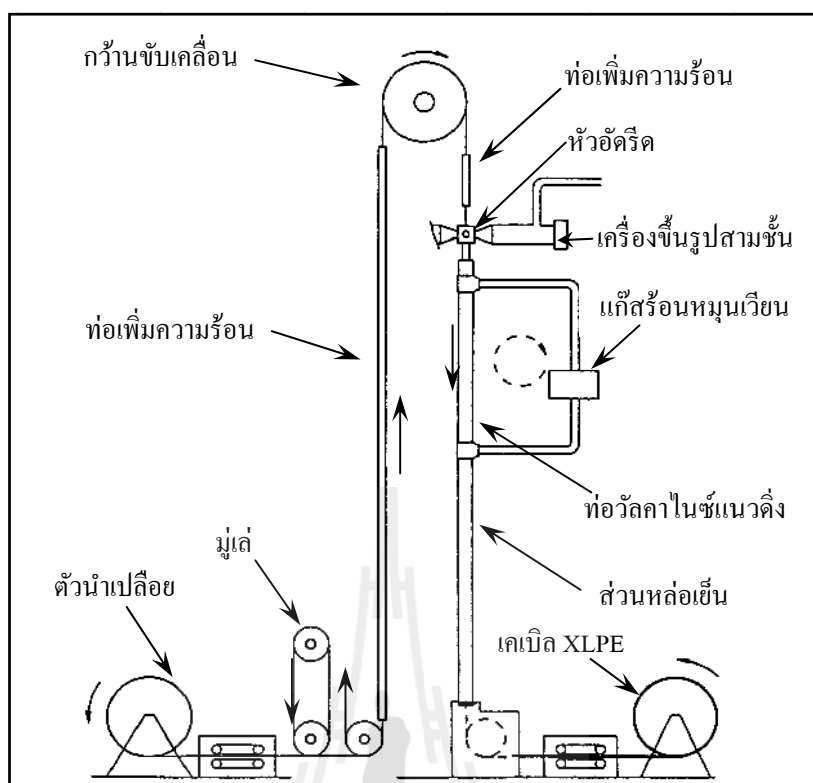
กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวตั้ง (Vertical Continuous Vulcanization: VCV) เป็นกระบวนการอบของสายเคเบิลฉนวน PE ที่ยังไม่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยหลักการทำงานเช่นเดียวกับกระบวนการ CCV แต่มีความแตกต่างกันที่รูปทรงแบบของท่อลำเลียงที่ใช้ในกระบวนการอบเท่านั้น โดยท่อลำเลียงในการอบเพื่อเชื่อมขวางจะวางในแนวตั้ง แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลระบบวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแนวตั้งแสดงในรูปที่ 3.13 กระบวนการวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวตั้ง ไม่มีปัญหาการตกท้องข้างของตัวนำจึงสามารถผลิตสายเคเบิลที่มีพื้นที่หน้าตัดของตัวนำขนาดใหญ่มากกว่า  $1600 \text{ mm}^2$  หรือความหนาของฉนวนมากกว่า  $35 \text{ mm}$  และยังสามารถเลือกใช้วัสดุเพื่อมาทำเป็นฉนวนได้มากกว่าระบบวัลคาไนซ์แบบ CCV และ MDCV ระบบวัลคาไนซ์ต่อเนื่องแบบแนวตั้งได้รับความนิยมสำหรับผลิตสายเคเบิลในระบบแรงดันสูงพิเศษ อย่างไรก็ตาม

ก็ตาม ราคาในการก่อสร้างโรงงานผลิตสายเคเบิลในแนวดิ่งสูงกว่าโรงงานผลิตสายเคเบิลใน แนวระนาบมากเนื่องจากต้องสร้างโรงงานผลิตสายเคเบิลที่มีความสูงมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.14

ขั้นตอนสุดท้ายในการผลิตสายเคเบิล XLPE คือขั้นตอนการทำ Degassing เป็นการทำให้เกิดความมั่นใจในประสิทธิภาพการทำงานของฉนวน XLPE ที่ได้จากกระบวนการเชื่อมขวางโดยวิธีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นฉนวนในสายเคเบิลแรงสูงหรือ สายเคเบิลแรงสูงพิเศษ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการขจัดหรือลดสารประกอบบางชนิดในฉนวน XLPE ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเชื่อมขวาง มิฉะนั้นจะทำให้เกิดปัญหาทางโครงสร้างของฉนวน XLPE และส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวนได้ วิธีการขจัดสารประกอบดังกล่าวเรียกว่า ขั้นตอน Degrassing สารประกอบบางชนิดที่ต้องขจัดออกจากเนื้อฉนวนได้แก่ อะซีโตฟีโนล เมทิลสไตรีน (Methylstyrene) คัมมิลอัลกอฮอล์ และมีเทน เป็นต้น

ในวงการอุตสาหกรรมทั่วไป จะขจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการในสายเคเบิลโดยใช้วิธีการจัดแบบธรรมชาติ ซึ่งเป็นการเก็บสายเคเบิลไว้ระยะหนึ่ง (ประมาณ 7 วัน) ก่อนทำการทดสอบประจำ (Routine Testing) สำหรับสายเคเบิลแรงสูง และแรงสูงพิเศษ จะถูกเก็บไว้ในห้องขนาดใหญ่ที่มีอุณหภูมิปานกลางระหว่าง 50–80°C เพื่อทำการขจัดสารประกอบและสารเติมแต่งออกจากสายเคเบิล อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาที่ใช้ในการขจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการของสายเคเบิลอาจต้องพิจารณาจากปัจจัยในด้านอื่น ๆ ประกอบด้วย เช่น โครงสร้างของตัวนำไฟฟ้า และการบวมของสายเคเบิลในระหว่างการขจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการ เป็นต้น (Electric Cables Handbook, 3<sup>rd</sup> edition, G.F. Moore, 1997)





รูปที่ 3.13 แผนผังระบบการผลิตของสายเคเบิลโดยระบบ VCV



รูปที่ 3.14 โรงงานผลิตสายเคเบิลระบบแรงดันสูงพิเศษตั้งอยู่ทางตอนเหนือของสหรัฐอเมริกา  
(ที่มา <http://www.charlestonbusiness.com/news/31305/print>)

เมื่อผ่านทุกกระบวนการการผลิตแล้ว สายเคเบิลจะถูกทำการตรวจสอบคุณภาพ เพื่อให้มีความแน่ใจว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้ทำการออกแบบและผลิตขึ้น ตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าหรือไม่ การตรวจสอบคุณภาพของสายเคเบิลโดยทั่วไปจะทำการตรวจสอบคุณภาพของตัวนำไฟฟ้า ขนาดของสายและฉนวน การเกิดคิสซาร์จบางส่วน โพรงหรือช่องว่างในเนื้อฉนวนสิ่งเจือปนในเนื้อฉนวน และการถลอกหรือโปนออกของเนื้อฉนวน โดยมีการทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด ตัวอย่างเช่น IEC ANSI/ICEA JEC และ CENELEC เป็นต้น

### 3.7 การเสื่อมอายุของสายเคเบิลไฟฟ้า

การใช้สายเคเบิลไฟฟ้าเป็นเวลานานย่อมต้องมีการเกิดการเสื่อมอายุทางฉนวนอันเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ผลกระทบทางความร้อนและความเครียดทางไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อฉนวนไฟฟ้า ในบางกรณีการเสื่อมอายุของสายเคเบิลไฟฟ้าสามารถเกิดจากสภาวะแวดล้อมได้เช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น ความชื้น รังสีอัลตราไวโอเลต และ ความร้อนจากทางกลต่าง ๆ สิ่งเหล่านี้อาจเป็นตัวการทำให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้าได้เช่นกัน สมมติฐานในการเสื่อมอายุและผลกระทบที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวนของสายเคเบิลไฟฟ้า XLPE จึงมีดังนี้

#### 3.7.1 กลไกการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์

สารอนุมูลอิสระในฉนวนพอลิเมอร์เกิดขึ้นจากกลไกการคิสซาร์จทางไฟฟ้า การเกิดออกซิเดชัน ผลของรังสีอัลตราไวโอเลต การแผ่รังสีแกมมาและไอโซน ทำให้เกิดไอออนในระหว่างการใช้งานปกติของสายเคเบิล การคิสซาร์จขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า ความถี่ จำนวน และความถี่เป็นไปได้อาจตำแหน่งการกระจายตัวของคิสซาร์จ การเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสารอนุมูลอิสระของพอลิเมอร์สามารถแบ่งย่อยออกได้ 3 ประเภทได้แก่ การแตกแขนงหรือเกิดโครงข่ายใหม่ของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ การขาดของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ และการเกิดออกซิเดชันโดยการดูดกลืนออกซิเจน การแตกแขนงของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์จะทำให้วัสดุพอลิเมอร์มีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การขาดของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์และการเกิดออกซิเดชัน จะทำให้พอลิเมอร์สูญเสียน้ำหนักโมเลกุลทำให้พอลิเมอร์มีความเปราะเพิ่มขึ้น การเกิดออกซิเดชันยังเป็นการเพิ่มข้อและปัจจัยการสูญเสียความเปราะเป็นฉนวนให้กับวัสดุพอลิเมอร์ แต่ละปฏิกิริยามีความซับซ้อนและมักไม่สามารถวัดได้โดยตรง

1) การเสื่อมสภาพทางเคมีจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของฉนวนพอลิเมอร์ ผลจากการเสื่อมสภาพทางเคมีจะทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ขาด กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่าการสลายสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ (Depolymerisation) หรืออาจจะทำให้เกิดกระบวนการเชื่อมขวางใหม่เกิดขึ้น จะทำให้ฉนวนพอลิเมอร์มีความเปราะในบริเวณที่เกิดขึ้น สารอนุมูลอิสระเป็น

ส่วนหนึ่งของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี สารอนุมูลอิสระเหล่านี้เกิดขึ้นระหว่างการเกิดออกซิเดชันของฉนวน อัตราการก่อตัวของสารอนุมูลอิสระขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปริมาณของออกซิเจน และความเข้มของรังสี หมายเหตุ การเกิดดีสซาร์จบางส่วนภายในฉนวนจะก่อให้เกิดการก่อตัวของสารอนุมูลอิสระส่งผลให้เกิดแก๊สบางอย่าง กรด และรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) ซึ่งเป็นอันตรายต่อฉนวน พอลิเมอร์ทั้งสิ้น

2) การเสื่อมสภาพจากความร้อน โดยปกติในการใช้งานสายเคเบิลฉนวน XLPE อุณหภูมิควรต่ำกว่า  $90^{\circ}\text{C}$  แต่ในสภาพผิดปกติของสายเคเบิลฉนวน XLPE สามารถทนอุณหภูมิได้ถึง  $120^{\circ}\text{C}$  ที่อุณหภูมิระหว่าง  $150^{\circ}\text{C}$  ถึง  $225^{\circ}\text{C}$  สารอนุมูลอิสระอาจจะติดไปกับโซ่หลักของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์โซ่อื่น ๆ ที่ก่อให้เกิดการเชื่อมขวาง การเชื่อมขวางจะลดความแข็งแรงเชิงกลและความหนาแน่นของผลึก ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $225^{\circ}\text{C}$  เกิดการก่อตัวของกลุ่มทรานส์ไวนิล (Trans-Vinyl) แสดงถึงการจัดเรียงตัวของสารอนุมูล ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $350^{\circ}\text{C}$  การเสื่อมสภาพของพลาสติกเกิดขึ้นโดยการสลายตัวของพอลิเมอร์และการแตกจากความร้อนที่ไม่สมบูรณ์

3) การเสื่อมสภาพจากสนามไฟฟ้า ข้อบกพร่องที่อันตรายที่สุดในฉนวนพอลิเมอร์เกิดจากการเสื่อมสภาพเนื่องจากไฟฟ้า ดีสซาร์จบางส่วน ทริอิงทางไฟฟ้าและทริอิงจากน้ำล้วนเป็นสาเหตุสำคัญในกลไกการเสื่อมอายุของฉนวนทั้งสิ้น การเสื่อมสภาพจากไฟฟ้าจะส่งผลต่อฉนวนแบบสุ่มตำแหน่งในการเกิด การเสื่อมสภาพจากไฟฟ้าจะไม่มีผลต่อความยาวของสายเคเบิลทั้งหมด ในขณะที่การเสื่อมสภาพจากความร้อนนั้นจะมีผลต่อความยาวสายเคเบิลทั้งหมด ข้อบกพร่องนำไปสู่การ เบรกดาวน์ในสายเคเบิลและมักจะเกิดในบริเวณที่เกิดความบกพร่องของฉนวน ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำและเวลาชานานเป็นพื้นฐานสำหรับกลไกการเสื่อมอายุในสายเคเบิลระบบแรงดันปานกลางได้เช่นกัน

### 3.7.2 กระบวนการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE

ในปัจจุบัน นักวิจัยเป็นจำนวนมากทำการศึกษาเกี่ยวกับการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE เมื่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลานาน โดยศึกษาด้วยวิธีการทดสอบแบบเร่งการเสื่อมอายุและพัฒนาแบบจำลองการเสื่อมอายุ เพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ในการทดสอบการเร่งการเสื่อมอายุของฉนวน XLPE โดยทั่วไปมักจะทดสอบการเสื่อมอายุภายใต้สภาวะความเครียดเดียวหรือสภาวะความเครียดหลายแบบ แต่โดยส่วนใหญ่แล้วการเสื่อมอายุมักเกิดจากสภาวะความเครียดทางไฟฟ้าและทางความร้อน เพราะทั้งสองปัจจัยนี้เกิดขึ้นพร้อมกันในขณะที่ส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าของสายเคเบิลแรงสูง ดังนั้นสภาวะความเครียดที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นอย่างเดี่ยวหรือทั้งสองอย่างควบคู่กันไป สภาวะความเครียดโดยส่วนมากที่เกิดขึ้นและพบบ่อยในฉนวนเคเบิลแรงสูง

1) ความเครียดทางไฟฟ้า (Electrical Stress) กระบวนการเสื่อมอายุที่เกิดบ่อยที่สุดในฉนวนไฟฟ้า มีสาเหตุเนื่องมาจากความเครียดสะสมของเกรเดียนต์ไฟฟ้าในเนื้อฉนวน

2) ความเครียดทางความร้อน (Thermal Stress) กระบวนการเสื่อมอายุอันมีสาเหตุจากสภาวะความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวนำไฟฟ้าภายในสายเคเบิล ส่งผลให้อุณหภูมิของฉนวนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนหรือสูญเสียเสถียรภาพทางเคมีของเนื้อฉนวนได้

3) ความเครียดทางกล (Mechanical Stress) กระบวนการเสื่อมอายุอันมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของความเครียดทางกล ตัวอย่างเช่น การขยายตัวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การสั่นสะเทือน หรือแรงกดทางไฟฟ้า เป็นต้น

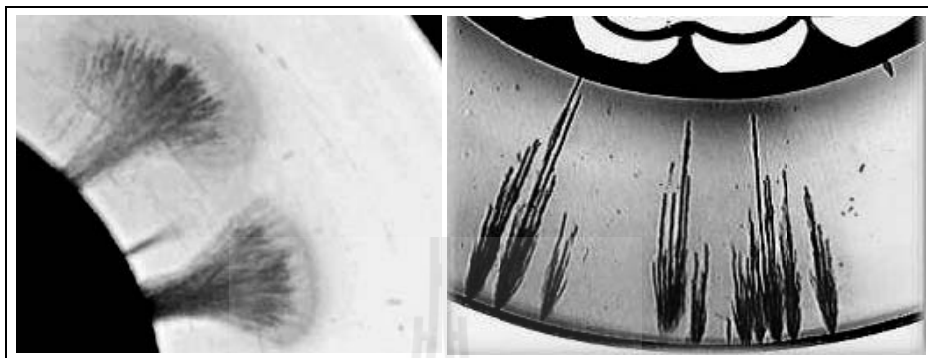
4) ความเครียดทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Stress) กระบวนการเสื่อมอายุอันมีสาเหตุจากสภาวะแวดล้อมของฉนวนเช่น ความชื้น ปฏิกิริยาทางเคมี การเกิดออกซิเดชัน และการแผ่รังสีจากนิวเคลียร์ต่าง ๆ เป็นต้น

โดยทั่วไปการเสื่อมอายุอย่างรวดเร็วของฉนวน ส่วนใหญ่มักเกิดจากอิทธิพลของสภาวะแวดล้อมของสายเคเบิล เช่น อุณหภูมิภายนอก การแผ่รังสี และความชื้น เป็นต้น นอกจากนี้ อาจเกิดจากความผิดปกติในกระบวนการผลิตสายเคเบิลด้วย ตัวอย่างเช่น การเกิดช่องโพรงอากาศในเนื้อฉนวน มีสิ่งเจือปนในเนื้อฉนวน หรือความผิดปกติของเครื่องจักรที่ผลิต สิ่งเหล่านี้สามารถเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการเสื่อมอายุของฉนวนไฟฟ้าได้เช่นกัน

### 3.7.3 ปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำ

จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง พบว่าการถูกทำลายและความเสียหายของสายเคเบิลส่วนใหญ่มีกมาจากการเกิดปรากฏการณ์ทริอิง ทริอิงเป็นลักษณะการเสื่อมอายุในสายเคเบิล สาเหตุที่เรียกว่าทริอิงเนื่องจากการกระจายของรูปร่างความผิดปกติที่ปรากฏขึ้นในเนื้อฉนวนคล้ายรูปทรงของต้นไม้หรือพุ่มไม้ ปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำเกิดจากความชื้นจากน้ำที่อยู่ภายนอกของเนื้อฉนวน XLPE ความชื้นของน้ำจะซึมเข้าสู่รอยตัดของเนื้อฉนวน (ในกรณีที่สายเคเบิลไฟฟ้ามีรอยตัดจากการใช้งาน) หรือช่องว่างระหว่างเกลียวของสารตัวนำไฟฟ้าแบบสายตีเกลียว ซึ่งนำไปสู่การลัดวงจรของเนื้อฉนวนและสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า อันเป็นสาเหตุหนึ่งของการเสื่อมอายุของฉนวนเคเบิลไฟฟ้า ปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำจะขยายตัวไปอย่างช้า ๆ ในช่วงระยะเวลาเป็นเดือนหรือเป็นปี โดยมีลักษณะคล้ายโรคมะเร็งฉนวนและสารกึ่งตัวนำไฟฟ้าของสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงหมดคุณสมบัติความเป็นฉนวนไปอย่างต่อเนื่อง การป้องกันการเกิดปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำสามารถทำได้โดยการหลีกเลี่ยงความชื้นให้ห่างไกลจากตัวสายเคเบิลไฟฟ้า หากสายเคเบิลไฟฟ้ามีการถูกตัดนำมาใช้แล้ว ควรหาอุปกรณ์ปิดหัวสายเคเบิลไฟฟ้าที่ถูกตัดเพื่อไม่ให้ความชื้นเข้ามายังเนื้อฉนวนได้ ความเครียดทางไฟฟ้า ทางกล ทางความร้อน และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำงานของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูงสามารถเพิ่ม

การขยายตัวทรีอิงจากน้ำได้รวดเร็วขึ้น ปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ การเกิดจากภายในของตัวสารกึ่งตัวนำออกสู่ภายนอกดังแสดงในรูปที่ 3.15(ก) และเกิดจากภายนอกสารกึ่งตัวนำเข้าสู่ภายในดังแสดงในรูปที่ 3.15(ข)



ก. การเกิดจากภายในสู่ภายนอก

ข. การเกิดจากภายนอกสู่ภายใน

รูปที่ 3.15 การเกิดปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง

การเกิดปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำเป็นหนึ่งในกลไกความผิพรองที่สำคัญที่สุดของสายเคเบิลไฟฟ้าขนาดแรงดันไฟฟ้ากลางและสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของสายเคเบิลใต้ดินหรือสายเคเบิลใต้น้ำควรทำการป้องกันเป็นพิเศษ ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบโครงสร้าง รวมทั้งวัสดุที่ใช้ควรสามารถป้องกันการเกิดทรีอิงจากน้ำได้ นอกจากจะแบ่งตามลักษณะการเกิดแล้ว ทรีอิงจากน้ำยังแบ่งย่อยออกได้อีก 2 ประเภท คือ ทรีอิงแบบ Bow-Tie และทรีอิงแบบ Vented ดังแสดงรูปที่ 3.16

1) Bow-Tie Treeing เกิดจากช่องว่างภายในเนื้อฉนวนจากกระบวนการผลิตทรีอิงเหล่านี้จะเกิดและขยายตัวในทิศทางของสนามไฟฟ้า Bow-Tie Treeing มีอัตราการขยายตัวเริ่มต้นได้เร็วเมื่อเทียบกับ Vented Treeing ถึงแม้ว่าจะขยายตัวได้เร็วในช่วงเริ่มต้นแต่ Bow-Tie Treeing ก็ไม่สามารถขยายตัวเพิ่มขึ้น และไม่มีนัยสำคัญเพียงพอที่จะเป็นสาเหตุให้เกิดความผิพรองของสายเคเบิลได้

2) Vented Treeing เริ่มเกิดและขยายตัวจากชั้นกำบังฉนวนเข้ามาภายในระบบฉนวน และขยายตัวได้ดีในทิศทางของสนามไฟฟ้า ใช้เวลาเกิดและขยายตัวอย่างช้า ๆ เป็นเดือนหรือเป็นปี และจะสามารถขยายตัวจนเจาะทะลุความหนาของเนื้อฉนวนได้ ทำให้สายเคเบิลฉนวนหมดสภาพความเป็นฉนวนเกิดความผิพรองในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง

ปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำ เกิดจากความชื้นที่อยู่ภายในฉนวน XLPE เป็นสาเหตุให้เกิดการเสื่อมอายุของสายเคเบิลไฟฟ้า ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญมาเป็นระยะเวลานาน กลุ่มวิจัยหลายกลุ่ม

จึงได้ให้ความสนใจศึกษาในด้านการป้องกันปรากฏการณ์นี้และได้มีการออกแบบและสร้างฉนวน Tree-retardant XLPE ขึ้นเพื่อป้องกันการเกิดทรีอิงจากน้ำ โดยวิธีการผลิตที่นิยมจะแบ่งเป็น 3 ประเภทคือ

1) การใช้สารเติมแต่งในฉนวน XLPE แบบทั่วไป สามารถทำได้โดยการนำสารมาเติมแต่งเข้ากับฉนวน โดยปกติเป็นสารอินทรีย์แบบมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและอยู่ในรูปของของเหลวที่อุณหภูมิห้อง นำมาใช้ร่วมกับฉนวน XLPE ธรรมดาซึ่งไม่มีการชะลอตัวการซึมของน้ำ เมื่อนำมาผสมกันจะได้ฉนวน XLPE ที่มีคุณสมบัติชะลอตัวการซึมของน้ำ ความเข้ากันระหว่างฉนวน XLPE และสารเติมแต่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะหากสารเติมแต่งและฉนวน XLPE เข้ากันได้ไม่ดีจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของสารเติมแต่งภายนอกโครงสร้างทางพอลิเมอร์จนเป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการป้องกันปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำแย่งจากเดิม สารโดเดคานอล (Dodecanol) และไซเลนเป็นตัวอย่างของสารเติมแต่งที่ใช้ในการผสมฉนวน XLPE

2) การผสมฉนวน XLPE กับวัสดุพอลิเมอร์ที่มีขั้ว เพราะวัสดุ PE เป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วและไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) จึงทำให้ไม่มีการรวมตัวของน้ำเกิดขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งในการผสมพอลิเมอร์รวมเอทิลีนแบบมีขั้วเข้ากับฉนวน XLPE ทำให้เกิดแนวโน้มในการชอบน้ำมากขึ้น (Hydrophilic) ซึ่งช่วยลดการรวมตัวของน้ำและการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ลดน้อยลงไปด้วย

3) การใช้วัสดุพอลิเอทิลีนแบบความหนาแน่นต่ำมาก เป็นวิธีการใหม่และมีประสิทธิภาพ สำหรับการเพิ่มความต้านทานการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำให้แก่ฉนวน XLPE วิธีนี้เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานของพอลิเอทิลีนเรซิน โดยเรียกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาก (Very Low Density Polyethylene : VLDPE) เป็นพอลิเอทิลีนแบบเส้นตรงที่มีกิ่งก้านสาขาชนิดหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีการผลิตที่ความดันต่ำถึงปานกลาง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซีเกลอร์ (Ziegler Catalyst) วัสดุ VLDPE เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นที่ต่ำมาก โดยมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า  $0.89-0.91 \text{ g/cm}^3$  การใช้วัสดุ VLDPE เป็นฉนวนสามารถช่วยลดการเกิดผลึก (Degree of Crystallinity) อันเป็นสาเหตุในการเสื่อมอายุในฉนวนเคเบิลได้อีกด้วย การใช้พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำเป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้สำหรับการเพิ่มความต้านทานการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำ วัสดุ LDPE มีค่าความหนาแน่นประมาณ  $0.91 - 0.93 \text{ g/cm}^3$  แม้วัสดุ LDPE จะมีประสิทธิภาพในการป้องกันการเสื่อมอายุน้อยกว่าวัสดุ VLDPE แต่ก็เป็นที่นิยมนำมาใช้เป็นฉนวน เนื่องจากมีราคาถูกกว่า



ก. Bow-Tie Treeing

ข. Vented Treeing

รูปที่ 3.16 ทริอิงจากน้ำในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูง

ผลของสนามไฟฟ้าเมื่อเกิดทริอิงจากน้ำ มีรายงานเกี่ยวกับความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของฉนวน XLPE จะลดลงเมื่อทริอิงจากน้ำมีการเติบโตมากขึ้น และแนวโน้มของการลดลงนั้นจะแปรผันตรงกับอัตราการเจริญเติบโตของทริอิงจากน้ำ

#### 3.7.4 ทริอิงทางไฟฟ้า

มีลักษณะคล้ายกับต้นไม้หรือรากไม้กล่าวคือ มีช่องว่างที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านทะลุเนื้อฉนวนได้อย่างรวดเร็วเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดความผิดปกติของฉนวน ทริอิงทางไฟฟ้าเริ่มเกิดจากการกัดเซาะพื้นผิวของฉนวนจนเกิดเป็นช่องว่างหรือสามารถเกิดต่อจากทริอิงจากน้ำ หรือเกิดจากประจุค้าง (Space Charge) ในสายเคเบิลฉนวน หรือเริ่มต้นได้จากช่องว่างขนาดเล็กภายในฉนวนพอลิเมอร์จากความบกพร่องของกระบวนการผลิตหากมีปริมาณสนามไฟฟ้าที่มากพอ ทริอิงทางไฟฟ้าจำแนกการเกิดได้เป็น 2 ระยะคือในระยะเริ่มต้นจะเป็นระยะที่มีการเคลื่อนที่ของประจุ ( $0.1 - 0.2 \text{ pC}$ ) ในแต่ละครั้งรอบของรูปคลื่นแรงดันที่ใช้งานจะส่งผลให้ฉนวนพอลิเมอร์ลดค่าความเป็นฉนวนลงอย่างช้า ๆ และนำไปสู่การกัดเซาะภายในเนื้อฉนวนเกิดช่องว่างขนาดเล็กในเนื้อฉนวน การฉีดประจุโดยเพิ่มความเข้มของสนามไฟฟ้าเข้าไปในเนื้อฉนวนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งของการเริ่มต้นปรากฏการณ์ ทริอิงทางไฟฟ้า เมื่อความเครียดทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดันกระแสสลับ พอลิเอทิลีนจะปลดปล่อยแสงในช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้และรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) บางช่วงที่แรงดันสูงกว่าเกณฑ์ เนื่องจากประจุขั้วบวกและขั้วลบถูกฉีดเข้าไปในพอลิเมอร์ แสงยูวีที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดสารอนุมูลอิสระไปสลายพันธะที่ยึดกันอยู่ เป็นผลให้เกิดช่องว่างขนาดเล็ก

และนำไปสู่การเกิดเป็นทรีอิงทางไฟฟ้า ระยะที่สอง ระยะการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้ามีลักษณะเหมือนกับโครงข่ายของการแตกกิ่งคือมีรูปแบบจากการขยายตัวของช่องว่างที่เกิดขึ้นเนื่องการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในกิ่งนั้น ๆ ดิสชาร์จบางส่วนที่มีประจุเพียง 5 pC ก็เพียงพอที่จะทำให้ค่าความเป็นฉนวนลดลงเพราะความร้อนที่เกิดขึ้น อัตราการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความเครียดของแรงดันที่ใช้งาน อุณหภูมิ สภาพแวดล้อมและความเครียดทางกล

ในระหว่างขั้นตอนการผลิตหรือการดำเนินการติดตั้งสายเคเบิลและอุปกรณ์ต่าง ๆ อาจทำให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กหรือฟองแก๊สจากภายในของฉนวนหรือในพื้นที่ผิวระหว่างชั้นของฉนวน เมื่อความเข้มของสนามไฟฟ้าภายในช่องว่างหรือฟองอากาศสูงมากพอจนทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้น ไอออนประจุบวกและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากดิสชาร์จบางส่วนจะชนกันบนพื้นผิวของฉนวนและการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวนก็จะเริ่มต้นขึ้น

ความขรุขระของพื้นผิวหรือสิ่งปนเปื้อนภายในฉนวนจะนำไปสู่การเกิดดิสชาร์จบางส่วน ช่องว่างที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าจากการขยายตัวของกิ่งก้านสาขาและพัฒนาเป็นทรีอิงทางไฟฟ้าทะลุผ่านฉนวน ปรากฏการณ์นี้รู้จักกันในชื่อ “ทรีอิงทางไฟฟ้า” ดังแสดงในรูปที่ 3.17 การเบรกดาวน์ของฉนวนสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าเป็นตัวเชื่อมระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว การเบรกดาวน์ยังสามารถเกิดขึ้นได้ก่อนที่จะมีการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าเชื่อมระหว่างอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.17 ทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวน (ที่มา: <http://www2.le.ac.uk/departments/engineering/research/electrical-power/images/Electrical%20Tree.jpg>)



ทริอิงทางไฟฟ้าสามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดหลัก ๆ ได้ 2 แบบด้วยกัน คือ

1) ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (Bush Treeing) ดังแสดงในรูป 3.18 (ก) ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่มเกิดขึ้นภายในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ เวลาในการเกิดและขยายตัวช้า มักเกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเครียดทางไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่เมื่อเกิดขึ้นแล้วก็สามารถพัฒนาไปเป็นทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งซึ่งเป็นอันตรายต่อระบบฉนวนในสายเคเบิลได้

2) ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง (Branch Treeing) ดังแสดงในรูป 3.18 (ข) ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งเกิดขึ้นภายในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ ใช้เวลาในการเกิดและขยายตัวอย่างรวดเร็ว มักเกิดในบริเวณที่มีความเครียดทางไฟฟ้าสูง หรืออาจจะมีมีความเครียดทางความร้อน ความเครียดทางกลมาเกี่ยวข้องด้วย ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่งเป็นอันตรายอย่างมากต่อระบบฉนวนในสายเคเบิลฉนวนพอลิเมอร์ เมื่อเกิดขึ้นแล้วจะขยายตัวต่อไปจนกระทั่งเจาะทะลุชั้นความหนาของฉนวน ทำให้ฉนวนหมดสภาพความเป็นฉนวนและเกิดความผิดปกติในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในที่สุด



(ก) ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม (ข) ทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง

รูปที่ 3.18 รูปแบบทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE (ที่มา: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5492239>)

### 3.8 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้ทำการอธิบายทฤษฎีและสมมติฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE อาทิเช่น วัสดุพอลิเมอร์สำหรับฉนวนสายเคเบิล ประเภทของวัสดุพอลิเมอร์ต่าง ๆ ที่ใช้เป็นเนื้อฉนวน คุณสมบัติของต่าง ๆ ของฉนวนพอลิเมอร์ที่นำมาทำสาย

เคเบิลไฟฟ้า วิชาการและการพัฒนาการของสายเคเบิล โครงสร้างทั่วไปของสายเคเบิล ประเภทของ  
ตัวนำไฟฟ้า คุณสมบัติต่าง ๆ ของตัวนำไฟฟ้า สาเหตุการเสื่อมอายุของฉนวนเคเบิล สาเหตุการเกิด  
ปรากฏการณ์หรือจากน้ำ และหรือทางไฟฟ้า เพื่อให้เข้าใจถึงรูปแบบโครงสร้างของสายเคเบิล  
ไฟฟ้าและการเสื่อมอายุได้ดียิ่งขึ้น

ในการศึกษาวิจัยหรือทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน จำเป็นต้องออกแบบและสร้างชุด  
ศึกษาวิจัยหรือทางไฟฟ้าเพื่อทำการสร้างหรือทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ซึ่งผู้ทำวิจัย  
จะกล่าวต่อไปในบทที่ 5



## บทที่ 4

### การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิล XLPE

#### 4.1 กล่าวนำ

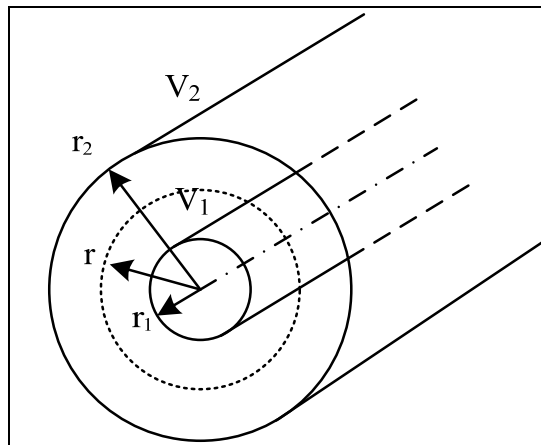
ในการศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงระบบ 22 kV ที่มี XLPE เป็นฉนวน การกำหนดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและระดับแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดต้องคำนึงถึงความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวน XLPE ให้อยู่ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 22 kV และความคงทนค่าไดอิเล็กตริกของฉนวน (Dielectric Strength of Material) ซึ่งระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว และระดับแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดมีความสัมพันธ์กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE

ในบทนี้ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 22 kV ด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม และจำลองสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในการศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Partial Differential Equation Toolbox (PDE) ใน MATLAB เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดรวมไปถึงระยะห่างที่เหมาะสมของอิเล็กโทรดทั้งสองขั้ว และใช้อธิบายการเริ่มต้นเกิดและขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE

#### 4.2 ความเครียดสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

ความเครียดของสนามไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบ 22 kV หาได้ด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมดังแสดงในรูปที่ 4.1 เส้นฟลักซ์ไฟฟ้าจะอยู่แนวรัศมีและพื้นผิวของทรงกระบอกคือพื้นผิวศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นโดยอาศัยการอินทิเกรตสมการแมกซ์เวลล์ดังสมการที่ (4.1)

$$Q = \int_S \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.1 ทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม

สำหรับทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมมีความยาว  $\ell$  รัศมี  $r$  ( $r_1 \leq r \leq r_2$ ) และ  $E = D/\epsilon$  จะหาค่าสนามไฟฟ้าที่รัศมี  $r$  ได้คือ

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \cdot \frac{1}{r} \quad (4.2)$$

และแรงดันที่ป้อนระหว่างทรงกระบอกซ้อนทั้งสอง คือ

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E_r dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} \quad (4.3)$$

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon\ell} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4.4)$$

จึงได้ความเครียดสนามไฟฟ้าที่  $r_1 \leq r \leq r_2$

$$E = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.5)$$

ฉะนั้นความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{\max}$  จะเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกระบอกซ้อนนั้นคือ

$$E_{\max} = E_{r_1} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4.6)$$

โดย  $U$  คือ แรงดันเฟส

$r_1$  คือ รัศมีของตัวนำไฟฟ้า

$r_2$  คือ รัศมีของฉนวน XLPE ร่วมกับรัศมีของตัวนำไฟฟ้า

สายเคเบิลฉนวน XLPE ที่ใช้ในการวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าเป็นสายเคเบิลแรงสูงสำหรับระบบจำหน่ายพิกัดแรงดัน 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีเส้นผ่านศูนย์กลางของฉนวนโดยรวมตัวนำ 18.4 mm ตัวนำเป็นทองแดงตีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.9 mm ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงสุดสามารถหาได้ดังนี้

จากสมการที่ (4.6) ทำการแทนค่าแรงดันไฟฟ้า รัศมีของตัวนำไฟฟ้า และรัศมีของฉนวน XLPE ร่วมกับรัศมีของตัวนำไฟฟ้าเพื่อหาค่า  $E_{\max}$  จะได้เท่ากับ 4.8 kV/mm

### 4.3 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าในการศึกษาวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้า

ในบทที่ผ่านมาผู้วิจัยได้นำเสนอผลการศึกษาวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าและการวิเคราะห์ผล ในบทนี้ผู้วิจัยนำเสนอการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยฟังก์ชัน PDE Toolbox ใน MATLAB เพื่อจำลองสนามไฟฟ้าก่อนการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE และช่วยอธิบายการเกิดและขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าให้เข้าใจง่ายมากยิ่งขึ้น

#### 4.3.1 PDE Toolbox

PDE Toolbox ประกอบด้วยเครื่องมือสำหรับการศึกษาและการแก้ปัญหาของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ในระบบ 2 มิติโดยผู้ใช้งานสามารถใช้งานผ่านทางสัญลักษณ์หรือภาพนอกเหนือจากตัวอักษร (Graphical User Interface: GUI) คำสั่งของ PDE Toolbox มี 6 คำสั่งประกอบด้วย

1) การวาดรูป (Draw) ช่วยให้สามารถสร้างรูปทรงเรขาคณิตได้หลายแบบทั้งสี่เหลี่ยม วงกลม วงรี และรูปหลายเหลี่ยม สามารถนำมารวมกันเพื่อสร้างรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อน

2) การกำหนดขอบเขต (Boundary) ช่วยให้สามารถระบุเงื่อนไขที่แตกต่างกันของขอบเขต

3) การเลือกปัญหา (PDE) ช่วยให้สามารถเลือกประเภทของปัญหาและระบุค่าสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหา

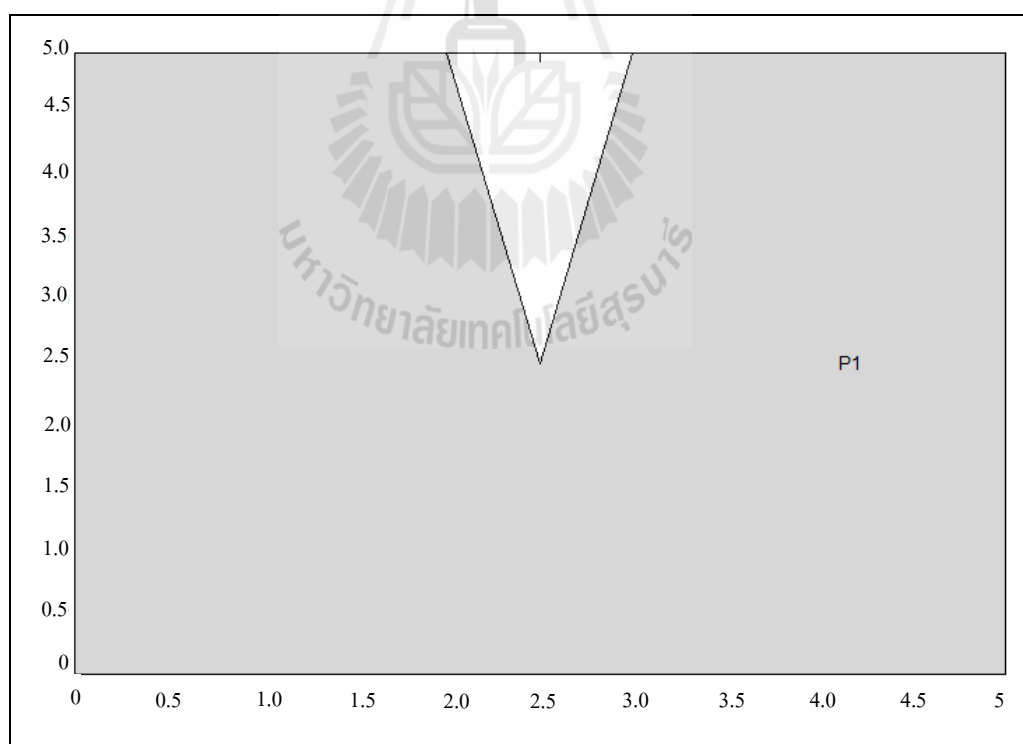
4) การกำหนดกริด (Mash) สามารถเลือกกริดอัตโนมัติหรือปรับแต่งแบบละเอียด

5) การแก้ปัญห (Solve) สามารถแก้ปัญห Elliptic Parabolic Hyperbolic โดยกำหนดค่าเริ่มต้นและเวลา

6) การพล็อต (Plot) สามารถเลือกประเภทการพล็อตที่แตกต่างกันรวมไปถึงพื้นผิว กริด Contour และยังสามารถแสดงคุณสมบัติต่าง ๆ โดยใช้ สี ความสูง และเวกเตอร์

#### 4.3.2 การจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าโดยใช้ PDE Toolbox

วาดรูปโดยให้อิเล็กโทรดปลายแหลมเสียบเข้าไปในเนื้อฉนวน XLPE และให้มีระยะห่างระหว่างปลายแหลมของอิเล็กโทรดกับขั้วต่อลงดิน (ตัวนำทองแดง) เท่ากับ 2.5 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ขนาดของฉนวนเท่ากับ 5×5 mm



รูปที่ 4.2 ขนาดของฉนวนและอิเล็กโทรดที่ใช้ในการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้า

เมื่อทำการกำหนดขนาดของพื้นที่จนวนและอิเล็กโทรดเรียบร้อยแล้ว ทำการกำหนดขอบเขตของพื้นที่โดยส่วนของอิเล็กโทรดทั้งสองให้กำหนดขอบเขตแบบ Dirichlet ตามสมการที่ (4.7) ดังแสดงในรูปที่ 6.3

$$h \times V = r \quad (4.7)$$

โดยที่  $V$  คือค่าศักย์ไฟฟ้าสถิต  
 $h$  คือค่าปัจจัยน้ำหนัก (ปกติมีค่าเท่ากับ 1)  
 $r$  คือค่าแรงดันใช้งานกำหนดให้เท่ากับแรงดันที่ใช้ในการศึกษาวิจัยหรือทางไฟฟ้าคือ 8 kV

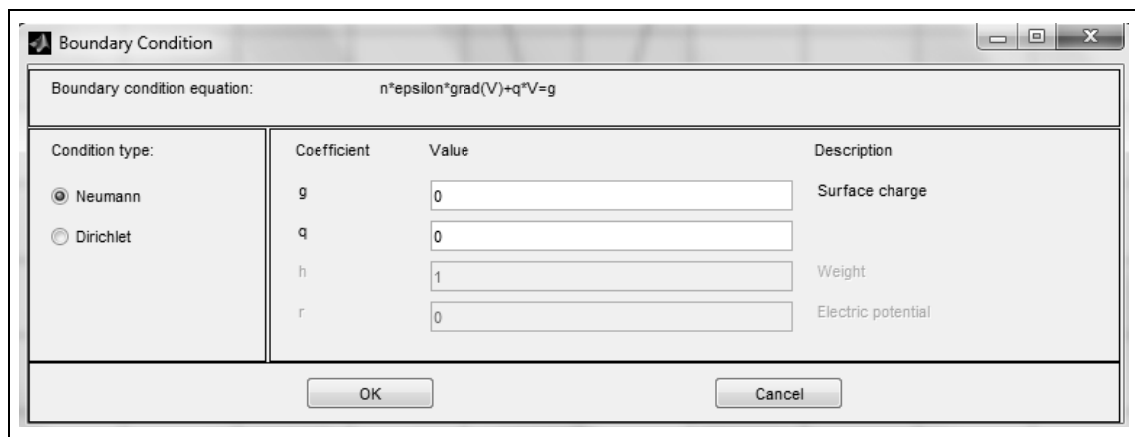
กำหนดขอบเขตในทุก ๆ ด้าน (ระหว่างจนวนกับอากาศ) ในแบบ Neumann ดังแสดงตามสมการที่ (4.8) ดังแสดงในรูปที่ 4.4

$$\vec{n} \times \varepsilon \times \vec{\nabla} V + q \times V = g \quad (4.8)$$

โดยที่  $q$  คือประจุ  
 $V$  คือศักย์ไฟฟ้า  
 $g$  คือประจุบริเวณผิว  
 $\varepsilon$  คือสภาพความต้านทานไฟฟ้า

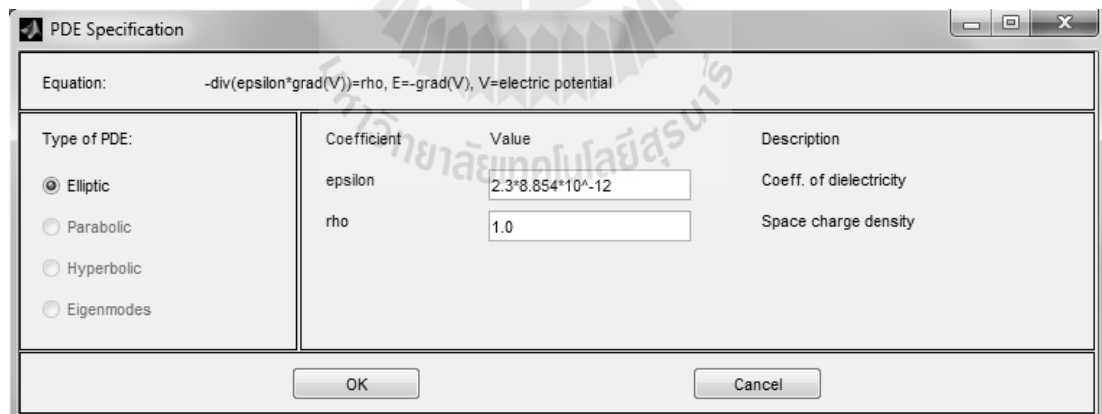
Condition type:	Coefficient	Value	Description
<input type="radio"/> Neumann	g	0	Surface charge
<input checked="" type="radio"/> Dirichlet	q	0	
	h	1	Weight
	r	8000	Electric potential

รูปที่ 4.3 การกำหนดขอบเขตแบบ Dirichlet



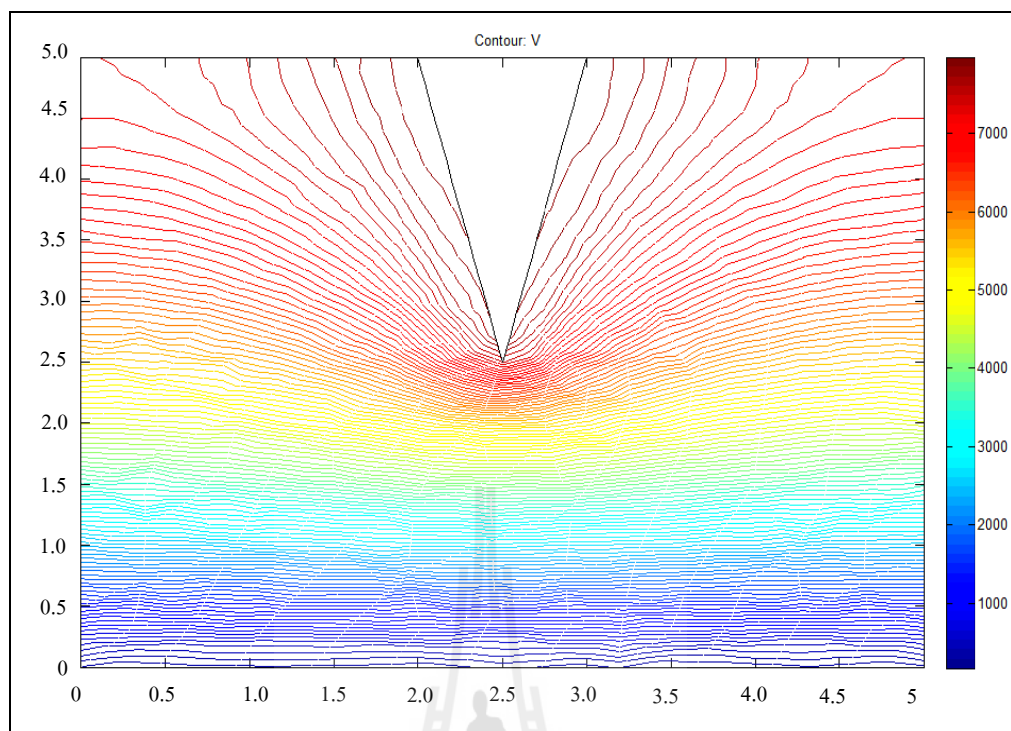
รูปที่ 4.4 การกำหนดขอบเขตแบบ Neumann

เมื่อกำหนดขอบเขตเรียบร้อยแล้ว ให้เลือกสมการ PDE แบบ Elliptic ค่า Epsilon คือค่าความคงทนของฉนวน (XLPE = 2.3 kV/mm) คูณกับค่า Epsilon ศูนย์ ( $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ ) ค่า Rho คือค่าความหนาแน่นของประจุค้างกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อทำการคำนวณตามสมการและสั่งพล็อตการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.6 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.7

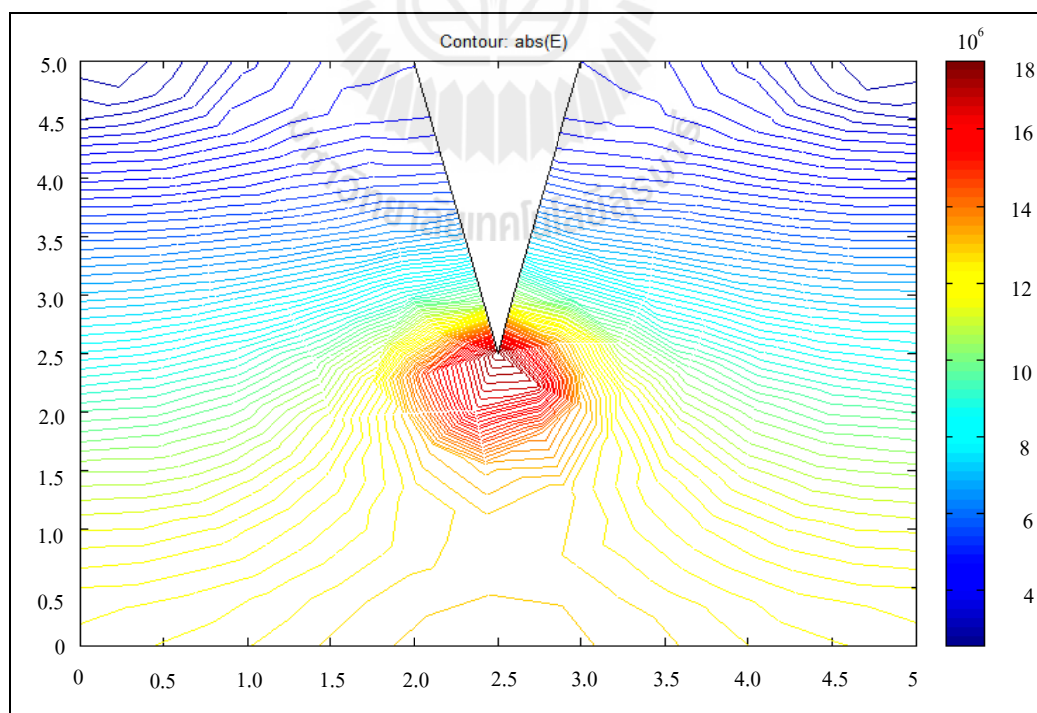


รูปที่ 4.5 การกำหนดค่าในสมการแบบ Elliptic





รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันทางไฟฟ้าในเนื่อฉนวน XLPE



รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายใต้แรงดัน 8 kV ในเนื่อฉนวน XLPE

จากการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดบริเวณปลายของอิเล็กโทรดปลายแหลม ( $E_{in}$ ) มีค่าเท่ากับ 17.53 kV/mm ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวน XLPE ( $E_c = 50$  kV) แต่มีค่ามากกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลฉนวน XLPE ระบบ 22 kV ซึ่งคำนวณด้วยวิธีทรงกระบอกซ้อนกันตามที่ได้นำเสนอมาแล้วข้างต้น ( $E_{max} = 4.8$  kV/mm) ซึ่งค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดบริเวณอิเล็กโทรดปลายแหลมที่เหมาะสมสำหรับการเกิดของทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE ควรอยู่ระหว่าง ( $E_{max} < E_{in} < E_c$ )

ถ้าให้  $E_{in}$  มากกว่าค่าความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวน  $E_c$  ทำให้ฉนวนเกิดเบรกดาวน์ แต่ถ้าให้  $E_{in}$  น้อยกว่าค่า  $E_{max}$  ทริอิงทางไฟฟ้าก็จะไม่เกิดขึ้นเพราะว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ให้อาจจะสร้างทริอิงทางไฟฟ้านั้นน้อยกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของสายเคเบิลในสภาพใช้งานปกติ ทริอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเริ่มเกิดบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดคือบริเวณปลายของอิเล็กโทรดปลายแหลม และจะขยายตัวออกไปตามทิศทางของเส้นแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.6

#### 4.4 สรุป

ในบทที่ 4 นี้ได้ทำการคำนวณค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในสายเคเบิลแรงสูงระบบ 22 kV ฉนวน XLPE ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่นำมาศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้า โดยใช้วิธีทรงกระบอกซ้อนกันตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้ค่า  $E_{max} = 4.8$  kV/mm การจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าด้วย PDE Toolbox ใน MATLAB ได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ปลายอิเล็กโทรดปลายแหลมเท่ากับ  $E_{in} = 17.53$  kV/mm และเมื่อพิจารณาจากค่าความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวน XLPE มีค่าเท่ากับ 50 kV/mm พบว่าที่ระยะห่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 2.5 mm และแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรดปลายแหลมเท่ากับ 8 kV จะได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดอยู่ระหว่างความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในการใช้งานจริง กับค่าความคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวน XLPE ( $E_{max} < E_{in} < E_c$ ) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE

เมื่อพิจารณาการเกิดและขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE พบว่าทริอิงทางไฟฟ้าจะเริ่มเกิดในบริเวณที่มีระดับความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดก่อน และจะขยายตัวออกไปตามแนวเส้นศักย์ไฟฟ้าจนกว่าจะเกิดเบรกดาวน์ในเนื้อฉนวน เนื่องจากทริอิงทางไฟฟ้าจะทะลุเนื้อฉนวนจนเกิดเป็นช่องว่าง ทำให้อิเล็กโทรดทั้งสองถูกเชื่อมเข้าหากัน

## บทที่ 5

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 5.1 กล่าวนำ

กระบวนการศึกษาวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าของฉนวนในสายเคเบิลไฟฟ้ามีหลากหลายวิธีสำหรับการวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าและความร้อนนั้น วิธีการที่ใช้กันโดยทั่วไปก็คือ การป้อนแรงดันและเพิ่มอุณหภูมิในระหว่างการวิจัย โดยจำลองความเครียดทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะเล็กน้อย-ระนาบในการสร้างทรีอิงทางไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวน โดยมีวิธีที่นิยมใช้ 2 วิธี ซึ่งวิธีแรกคือการป้อนแรงดันไฟฟ้าและความร้อนที่ค่าคงที่ค่าหนึ่งให้กับฉนวน จากนั้นทำการสังเกตลักษณะของทรีอิงที่เกิดขึ้นและบันทึกเวลาในการเกิด ลักษณะของทรีอิงและเวลาในการเกิดขึ้นอยู่กับค่าแรงดันที่ป้อนให้กับฉนวนและอุณหภูมิที่ใช้ในการวิจัย วิธีต่อมาคือการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับฉนวนเป็นจังหวะ (เพิ่มขึ้นต่อเนื่อง) จนกระทั่งเกิดทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวน จากนั้นจึงบันทึกข้อมูลลักษณะของทรีอิงทางไฟฟ้าและข้อมูลเวลาที่ใช้ในการเกิด

ในบทนี้ผู้ทำวิจัยกล่าวถึงการออกแบบชุดศึกษาและวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE การสร้างชุดศึกษาและวิจัยตามที่ออกแบบไว้ การเตรียมวัสดุ และการศึกษาและวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าดังต่อไปนี้

#### 5.2 การออกแบบและสร้างชุดศึกษาและวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้า

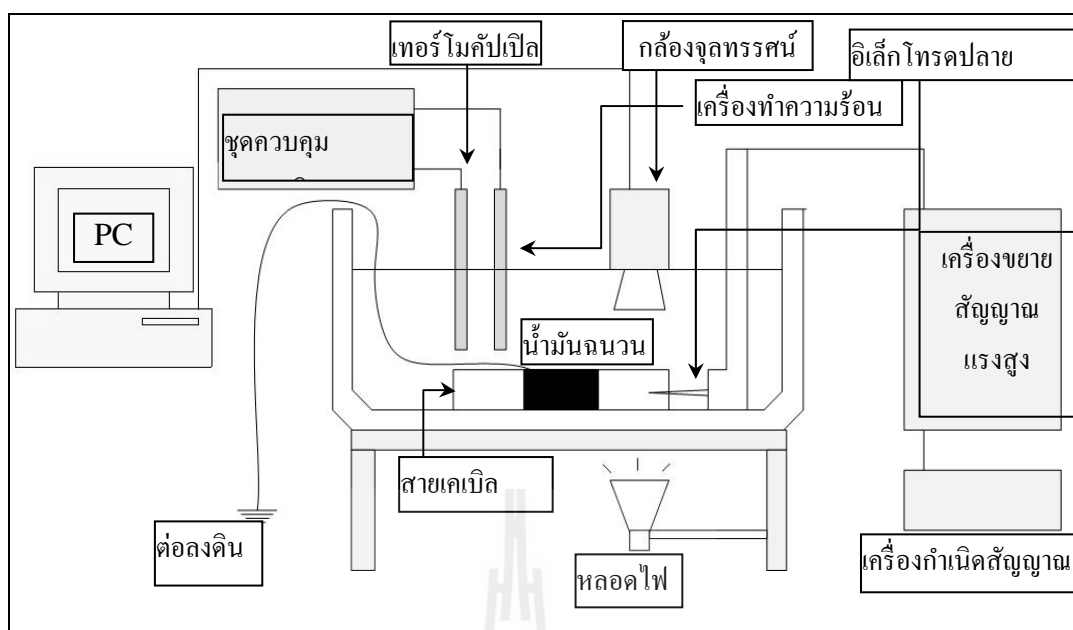
ชุดศึกษาและวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้า เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการสร้างทรีอิงทางไฟฟ้าให้กับสายเคเบิลฉนวน XLPE โดยจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ อุณหภูมิ ความถี่ของแรงดันในสภาวะต่าง ๆ ที่เกินการทำงานในสภาวะปกติของสายเคเบิล ชุดศึกษาและวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ อ่างแก้วทนความร้อนสำหรับใส่ชิ้นงานและชุดอิเล็กทรอนิกส์เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าแรงสูง เครื่องทำความร้อน วงจรควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง และระบบบดล้องจุลทรรศน์ในการบันทึกภาพของทรีอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ไดอะแกรมของชุดศึกษาและวิจัย ทรีอิงทางไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 5.1 และแบบร่างสามมิติของชุดศึกษาและวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE แสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3 โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดได้ดังนี้

### 5.2.1 อ่างแก้วนความร้อน

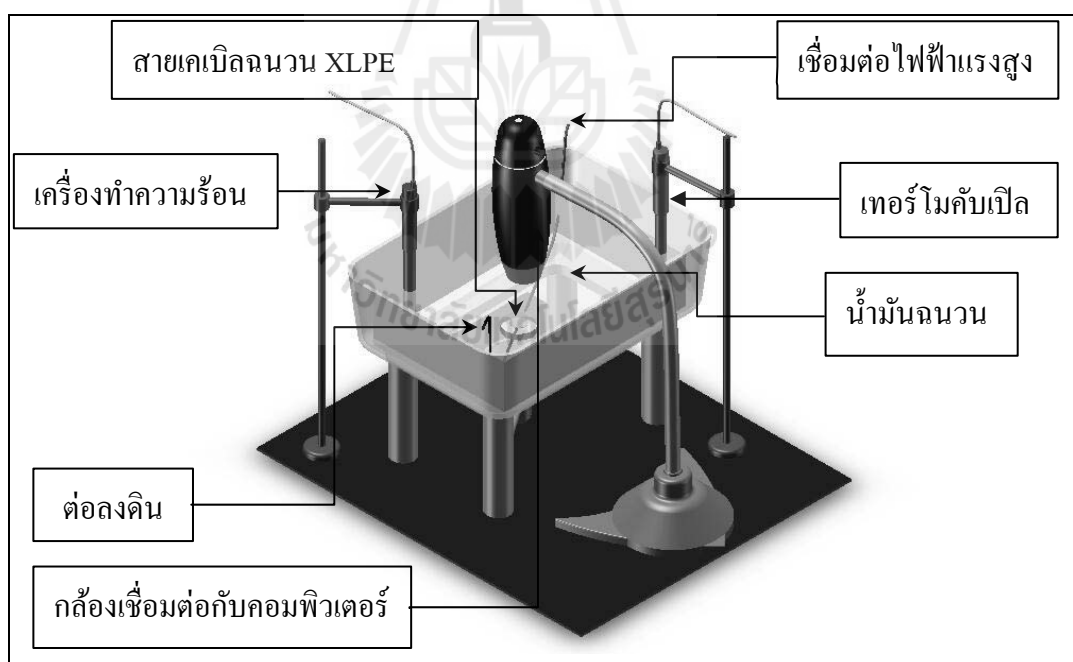
อ่างแก้วนความร้อนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 14 cm ยาว 20 cm สูง 6 cm ตั้งอยู่บนฐานสูงจากพื้น 8 cm โดยได้อ่างแก้วนความร้อนจะมีหลอดไฟฮาโลเจนเป็นตัวส่องสว่างให้กับชิ้นงานสายเคเบิลฉนวน XLPE ภายในมีน้ำมันหม้อแปลงเพื่อเป็นฉนวน และป้องกันการเกิดวาล์วไฟตามผิวของวัสดุทดสอบ ระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นแบบปลายแหลม-ระนาบ โดยให้ขั้วต่อลงดินเป็นอิเล็กทรอนิกส์แบบระนาบคือตัวนำไฟฟ้าทำจากทองแดงขนาด 12.9 mm เชื่อมต่อกับฐานยึดวัสดุทดสอบทำจากทองเหลืองเชื่อมต่อดิน อิเล็กทรอนิกส์ปลายแหลมมีขนาดของปลายแหลม 16  $\mu\text{m}$  (วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์) เชื่อมต่อกับอุปกรณ์สร้างไฟฟ้าแรงสูงเพื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุทดสอบ XLPE เพื่อสร้างหรือทางไฟฟ้า นอกจากนี้ภายในอ่างแก้วนความร้อนยังติดตั้งเครื่องทำความร้อน (Heater) และเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิขณะทำการศึกษาและวิจัย แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 5.4 และเมื่อทำการสร้างเสร็จแล้วจะมีรายละเอียดและสัดส่วนตามรูปที่ 5.5

### 5.2.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิ

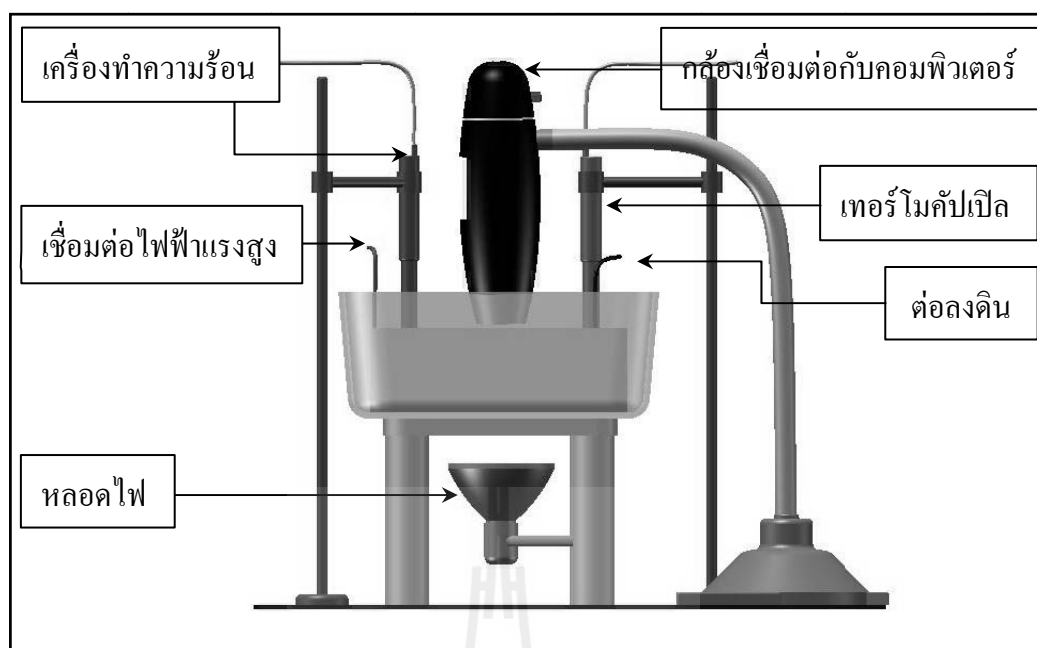
วงจรควบคุมอุณหภูมิ มีหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงในขณะที่ทำการสร้างหรือทางไฟฟ้า ซึ่งอยู่ในภายในอ่างแก้วนความร้อนให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องและคงที่แก่ชิ้นงาน ประกอบไปด้วย เครื่องทำความร้อน เทอร์โมคัปเปิล และกล่องควบคุมอุณหภูมิ ภายในกล่องควบคุมอุณหภูมิประกอบไปด้วยแมกเนติกคอนแทรกเตอร์ (Magnetic Contractor) ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) แสดงในรูปที่ 5.6 โดยที่เครื่องทำความร้อนทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำมันหม้อแปลงในอ่างแก้วนความร้อน เพื่อจำลองความเครียดทางความร้อนเป็นแบบสั่งทำพิเศษมีรูปร่างเป็นวงแหวนรอบวัสดุทดสอบ เพื่อให้เกิดความร้อนกระจายอย่างทั่วถึงแก่น้ำมันหม้อแปลงระหว่างการทดสอบ ภายในอ่างแก้วนความร้อน และเทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่วัดค่าอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงและแสดงค่าของอุณหภูมิส่งไปยังกล่องควบคุมอุณหภูมิ โดยกล่องควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่รับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากจากเทอร์โมคัปเปิลมาประมวลผล เพื่อควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงให้อยู่ในระดับความร้อนที่ต้องการ โดยการศึกษาและวิจัยหรือทางไฟฟ้าในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีการจำลองความเครียดทางความร้อน ระดับอุณหภูมิประกอบด้วยอุณหภูมิ 25°C 60°C 75°C และ 90°C ตามลำดับ ชุดศึกษาและวิจัยหรือทางไฟฟ้าและกล่องควบคุมอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 5.7



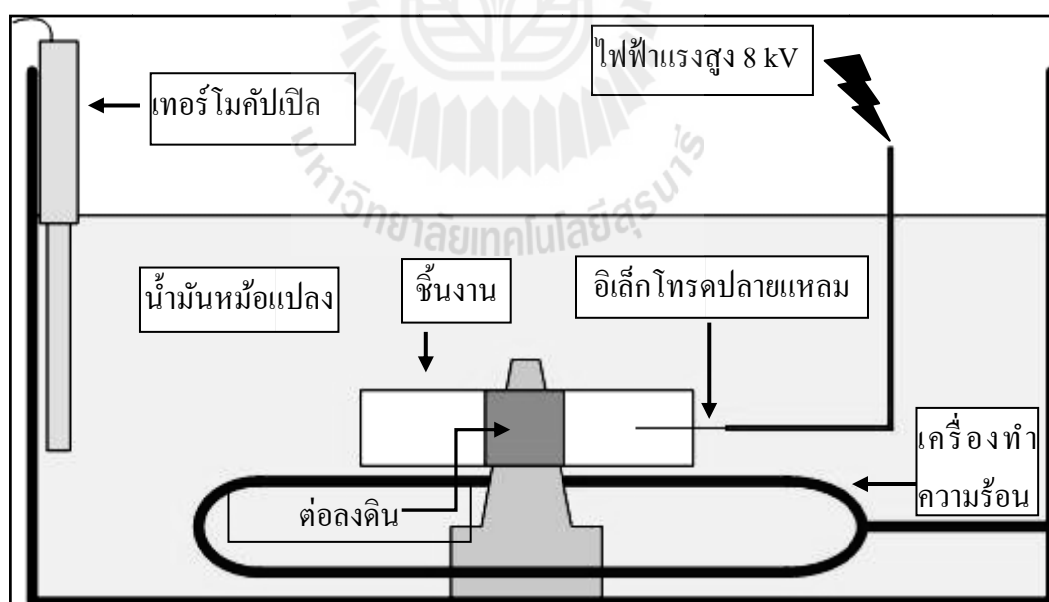
รูปที่ 5.1 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยทรีอิงของฉนวน XLPE



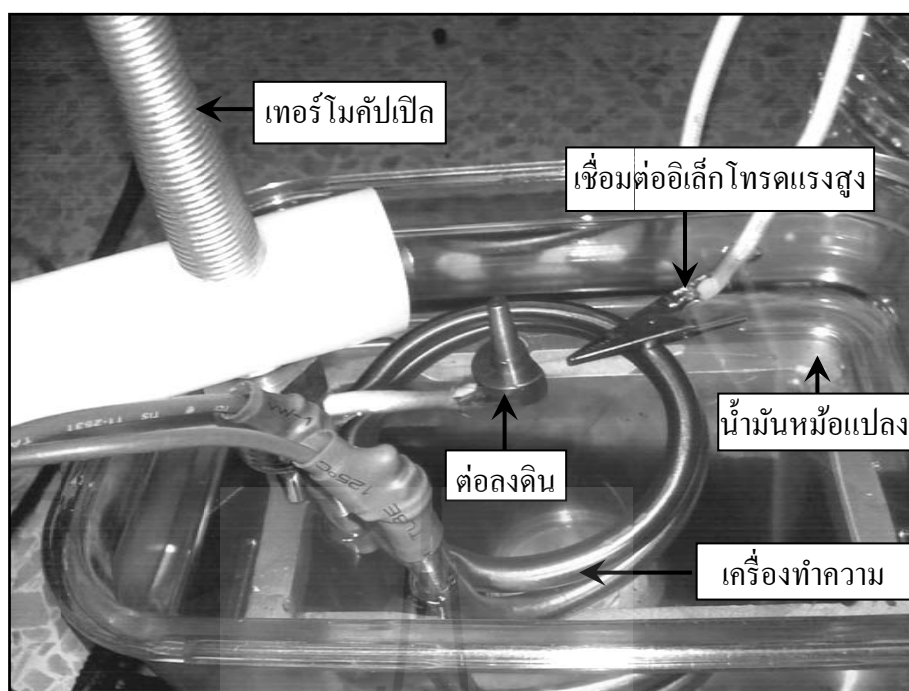
รูปที่ 5.2 แบบร่างสามมิติของชุดทดสอบทรีอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ตามที่ได้ออกแบบไว้



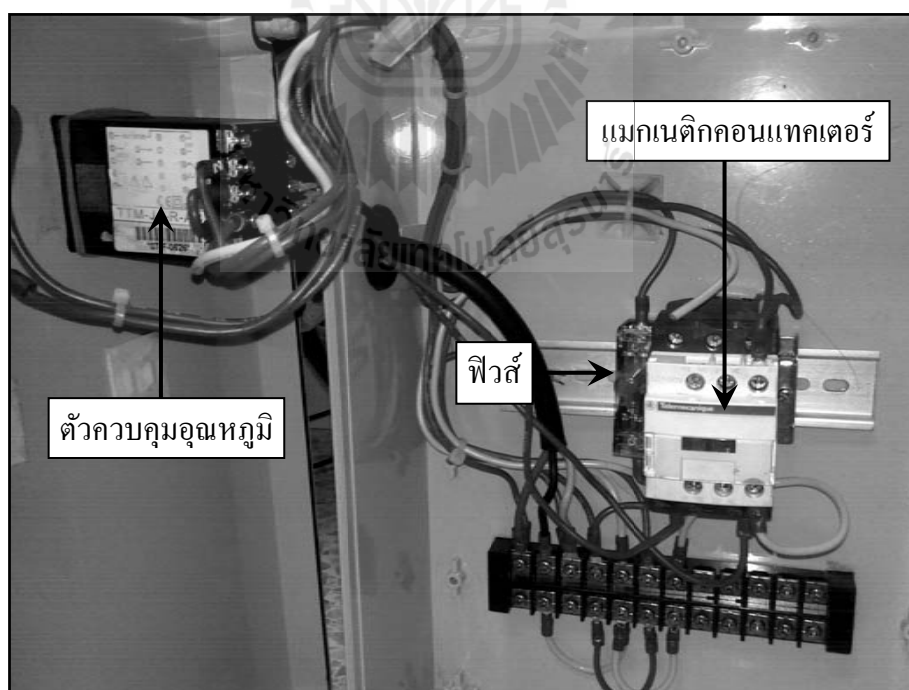
รูปที่ 5.3 แบบร่างสามมิติของชุดทดสอบทรีเฟสทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ตามที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 5.4 ไดอะแกรมอิเล็กโทรดและระบบควบคุมอุณหภูมิภายในชุดทดสอบ



รูปที่ 5.5 ระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอุณหภูมิภายในชุดทดสอบ



รูปที่ 5.6 ชุดควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลงภายในชุดทดสอบ

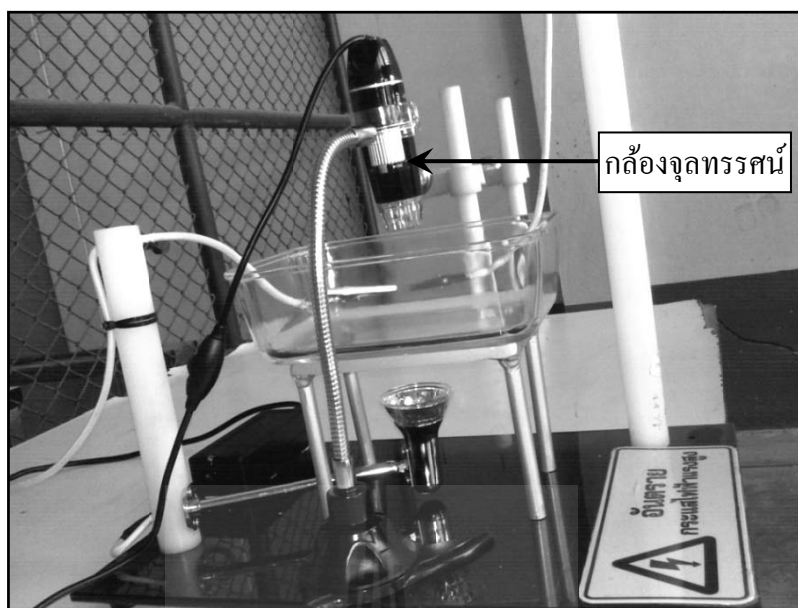


รูปที่ 5.7 ชุดทดสอบทริอิงทางไฟฟ้าและกล่องควบคุมอุณหภูมิ

### 5.2.3 ระบบกล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE เพื่อใช้ตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เพื่อบันทึกภาพการเกิดทริอิงในฉนวนสายเคเบิล XLPE ตั้งแต่เริ่มเกิดไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทดสอบ และยังทำหน้าที่บันทึกเวลาในการทดสอบอีกด้วย ในการศึกษาและวิจัยจะใช้กล้องจุลทรรศน์ขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อื่น ๆ แสดงในรูปที่ 5.8 แต่ในการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดของทริอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพื่อให้ได้ความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดจึงใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอขนาดใหญ่ที่มีซอฟต์แวร์ในการวัดขนาดและเปรียบเทียบ (OLYMPUS SZX9) แสดงในรูปที่ 5.9





รูปที่ 5.8 กล้องจุลทรรศน์ขนาด 5-500X (MICRO) ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 5.9 กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ในงานวิจัยขนาด 570X (OLYMPUS SZX9)

หลังจากสร้างชุดศึกษาและวิจัยทริโงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE แล้ว จึงนำชุดศึกษาและวิจัยดังกล่าวมาติดตั้งและเชื่อมต่อกับระบบแรงดันสูงจากเครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง เชื่อมต่อกับกล้องจุลทรรศน์เข้ากับคอมพิวเตอร์ ระบบสร้างแรงดันสูงประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) เชื่อมต่อกับเครื่องขยายสัญญาณแรงดันสูง (High Voltage Amplifier) พิกัด 20 kV ความถี่สูงสุด 10 kHz อัตราขยาย 1 ต่อ 2000 ระบบกำเนิดสัญญาณและขยายสัญญาณแรงดันสูงดังแสดงในรูปที่ 5.10 และชุดศึกษาและวิจัยทริโงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ดังแสดงในรูปที่ 5.11

เพื่อให้ค่าแรงดันที่จ่ายให้กับชิ้นงานทดสอบมีความถูกต้องแม่นยำ จึงใช้อุปกรณ์แบ่งวัดแรงดันสูง (Pico Scope) เป็นตัวแบ่งวัดแรงดันสูงที่ออกจากเครื่องขยายสัญญาณแรงสูง โดยจะแสดงผลรูปคลื่นสัญญาณและระดับแรงดันในคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.10 ระบบกำเนิดสัญญาณและขยายสัญญาณแรงดันสูงที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 5.11 ชุดศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

### 5.3 การศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE

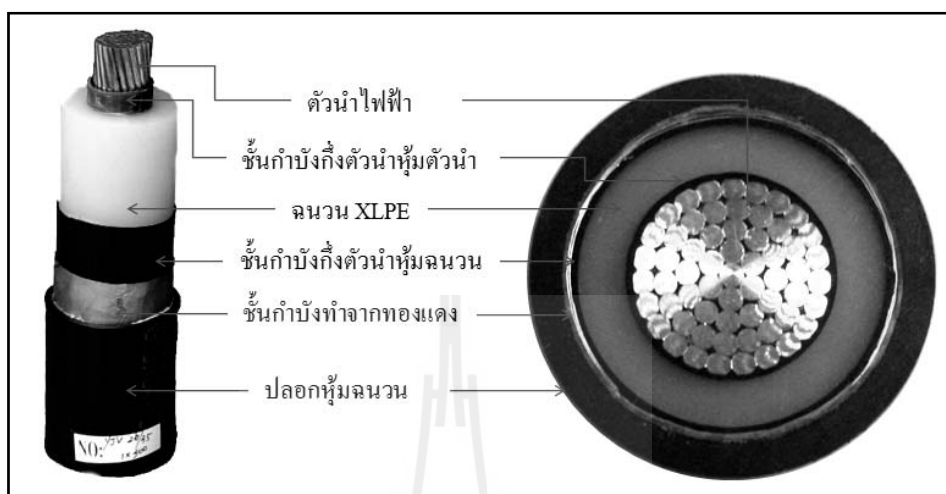
ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีสร้างทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE ด้วยวิธีการให้ความถี่ของแรงดัน อุณหภูมิและรูปคลื่นแรงดันในระหว่างการศึกษาศึกษาและวิจัยสูงกว่าการทำงานของฉนวน XLPE โดยให้ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในค่าคงที่ในระหว่างการศึกษาศึกษาและวิจัยจนกว่าจะเกิดทริอิงทางไฟฟ้าโดยทำการบันทึกภาพตลอดการศึกษาศึกษาและวิจัย การศึกษาและวิจัยทริอิงของฉนวน XLPE มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

#### 5.3.1 การตัดชิ้นงานฉนวน XLPE

การศึกษาศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของสายเคเบิลฉนวน XLPE ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างทริอิงทางไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวน XLPE และทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของฉนวนบันทึกภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (Stereo Microscope) ไปตลอดการทดสอบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตัดสายเคเบิลฉนวน XLPE 22 kV ให้มีความหนาที่เหมาะสม เพื่อให้กล้องจุลทรรศน์จับภาพของทริอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน สำหรับการศึกษาศึกษาและวิจัยจึงกำหนดให้สายเคเบิลฉนวน XLPE ที่นำมาศึกษาศึกษาและวิจัยมีความหนาอยู่ที่ 5 mm

สายเคเบิลแรงสูงที่นำมาศึกษาศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าเป็นสายเคเบิลแรงสูงสำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน โดยมีฉนวนเป็นวัสดุ

XLPE ขนาดความหนาเท่ากับ 5.5 mm และตัวนำเป็นทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.9 mm ตรงตามมาตรฐาน IEC 60502-2-2005 ดังแสดงในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 สายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงขนาด 22 kV ที่นำมาศึกษาและวิจัย

วิธีการเตรียมวัสดุสำหรับการศึกษาและวิจัย เริ่มต้นจากนำสายเคเบิลมาตัดตามแนวขวางด้วยเครื่องตัดละเอียดแบบหล่อเย็นดังแสดงในรูปที่ 5.13 โดยให้มีความหนา 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 5.14 จากนั้นแกะปลอกหุ้มฉนวน ชั้นกำบัง และสารป้องกันกึ่งตัวนำหุ้มฉนวนให้เหลือแต่ฉนวน XLPE สารป้องกันกึ่งตัวนำหุ้มตัวนำ และตัวนำไฟฟ้า นำสายเคเบิลมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 °C ใช้เวลาอบประมาณ 5 นาทีเพื่อไล่ความชื้นที่เกิดขึ้นจากการตัดสายเคเบิลแบบหล่อเย็น จากนั้นใช้อิเล็กโทรดปลายแหลมเสียบเข้าไปในเนื้อฉนวนตามแนวตัดขวางโดยให้ปลายแหลมของอิเล็กโทรดอยู่ห่างจากสารป้องกันกึ่งตัวนำหุ้มตัวนำเป็นระยะ  $2.5 \pm 0.03$  mm (จากการคำนวณในบทที่ 4 แรงดัน 8 kV ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 2.5 mm)

เนื่องจากระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงกับกราวด์เป็นตัวแปรสำคัญในการเกิดและขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าจำเป็นต้องวัดระยะห่างอย่างละเอียด ด้วยเหตุนี้จึงใช้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอในการวัดระยะห่างของอิเล็กโทรดทั้งสองเพื่อความถูกต้องแม่นยำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันผลกระทบจากระยะห่างของอิเล็กโทรดที่ไม่เท่ากันในการเกิด ทริอิงทางไฟฟ้า ซึ่งอาจนำไปสู่ค่าผลการทดลองที่ผิดเพี้ยนได้ หลังจากตัดชิ้นงานเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงนำชิ้นงานที่สมบูรณ์เก็บใส่ในภาชนะมิดชิดและใส่ซิลิกาเจลแบบเม็ดเพื่อดูดความชื้น เป็นการป้องกัน

ไม่ให้เกิดปรากฏการณ์ทรีอิงจากน้ำ เนื่องจากความชื้นของอากาศในชั้นงานฉนวน ชั้นงานที่ถูกตัด  
โดยสมบรณ์ดังแสดงในรูปที่ 5.15

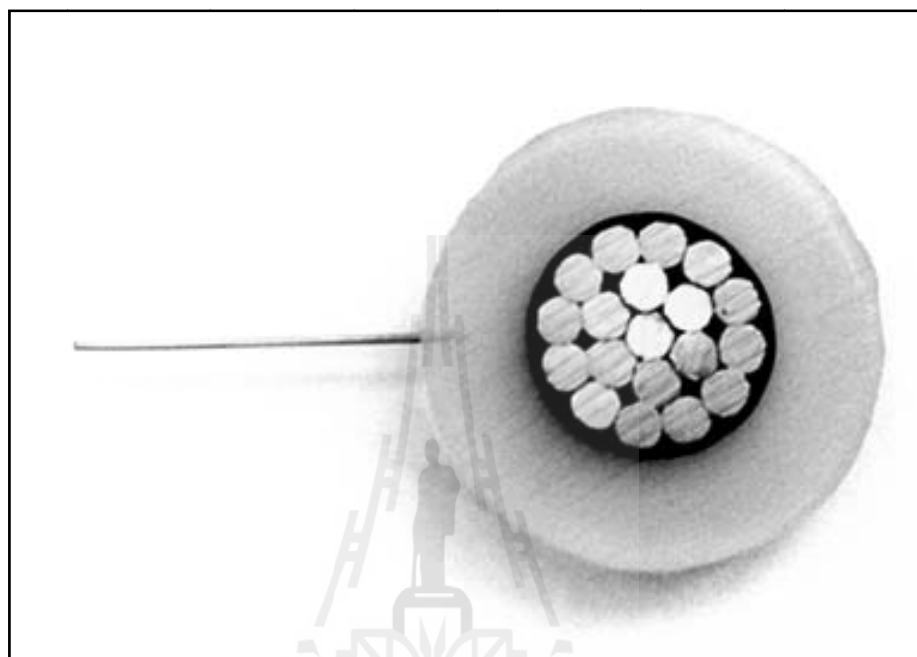


รูปที่ 5.13 เครื่องตัดเอนกประสงค์แบบหล่อเย็น

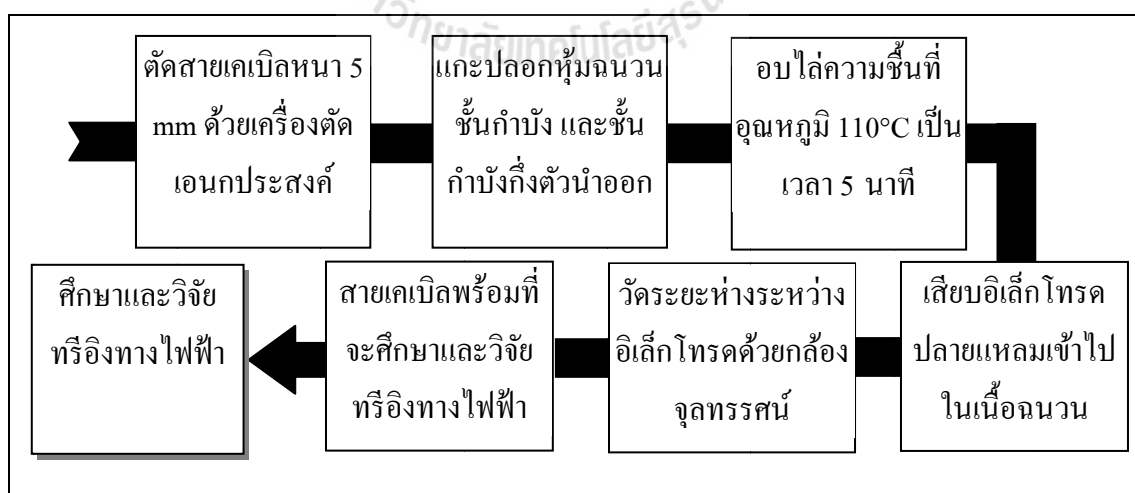


รูปที่ 5.14 ชิ้นงานที่ตัดด้วยเครื่องตัดเอนกประสงค์แบบหล่อเย็น

เพื่อลดความสับสนในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสายเคเบิลฉนวน XLPE สำหรับใช้ในการศึกษาและวิจัยทริองทางไฟฟ้า ผู้วิจัยจึงได้แสดงขั้นตอนและวิธีการเตรียมตัวอย่างก่อนที่จะทำการทดสอบดังแผนภาพแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.15 ชิ้นงาน XLPE ที่ถูกตัด ผ่านการอบไล่ความชื้น



รูปที่ 5.16 ขั้นตอนการเตรียมสายเคเบิลฉนวน XLPE

### 5.3.2 การศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE

การศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE สำหรับสายเคเบิลแรงสูง 22 kV ในงานวิจัยนี้ทุกชิ้นงานจะถูกทดสอบภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าที่ระดับแรงดัน 8 kV แต่จะเปลี่ยนสภาวะความเครียดทางความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว สภาวะความเครียดทางความร้อนเพียงอย่างเดียว สภาวะความเครียดของรูปคลื่นแรงดัน และสภาวะพหุความเครียด โดยให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดปลายแหลมกับระยะนามมีค่าเท่ากับ  $2.5 \pm 0.03$  mm ในการทดสอบแม้ว่ามีนักวิจัยหลายกลุ่มใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 3.5 mm หรือมากกว่าในการศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้า แต่ก็ต้องใช้ระดับแรงดันที่สูงขึ้น และเวลาในการทดสอบที่มากขึ้นตามไปด้วย และที่สำคัญขนาดความหนาของฉนวนในสายเคเบิลฉนวน XLPE 22 kV มีความหนาเพียง 5.5 mm เท่านั้นด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ใช้ระยะห่างของอิเล็กโทรดเท่ากับ 2.5 mm การศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าของฉนวน XLPE ในสภาวะต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

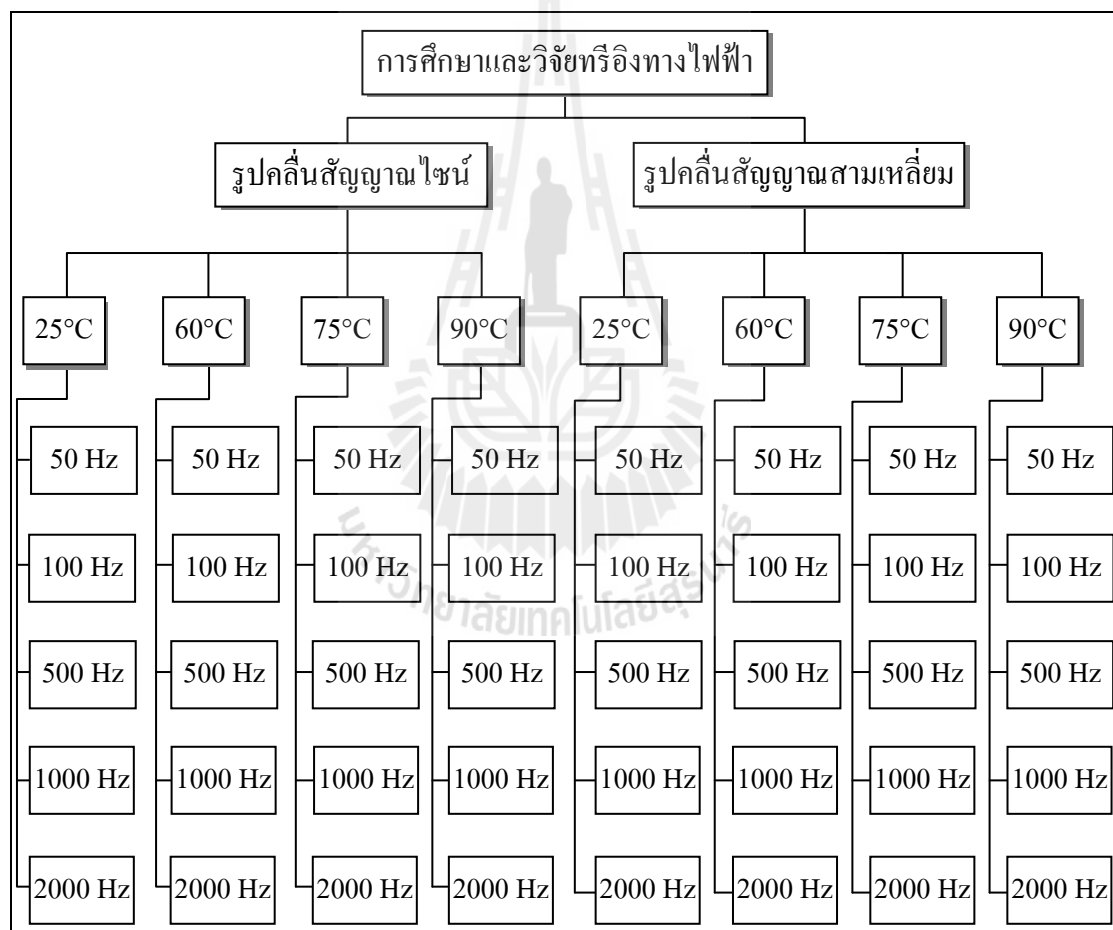
1) การศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เป็นการศึกษาและวิจัยลักษณะการเกิดทริอิงในเนื้อฉนวน XLPE เริ่มต้นด้วยการนำสายเคเบิลที่จัดเตรียมไว้เชื่อมต่อกับระบบอิเล็กโทรดแรงสูงและต่อลงดิน ในอ่างแก้วทนความร้อนบรรจุน้ำมันหม้อแปลงไว้ ชิ้นงานที่ศึกษาและวิจัยรวมไปถึงอิเล็กโทรดจะแช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อป้องกันการเกิด คิสซาร์จตามผิวของชิ้นงานที่ศึกษาและวิจัย ในการศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าจะใช้แรงดันรูปคลื่นไซน์ระดับแรงดันที่ 8 kV คงที่ตลอด ศึกษาและวิจัยที่อุณหภูมิ 25°C แต่จะเปลี่ยนความถี่ของแรงดันตั้งแต่ 50Hz 100Hz 500Hz 1000Hz และ 2000Hz ตามลำดับ

2) การศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าและความเครียดทางความร้อน โดยใช้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันไซน์พิกัดแรงดัน 8 kV ในการวิจัย ความถี่ของแรงดันตั้งแต่ 50Hz 100Hz 500Hz 1000Hz และ 2000Hz ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 60°C 75°C และ 90°C ตามลำดับ โดยทำการศึกษาและวิจัยซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้งเพื่อความถูกต้องและเที่ยงตรงของข้อมูล

3) การศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้า โดยใช้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม พิกัดแรงดัน 8 kV คงที่ ใช้อุณหภูมิ 25°C แต่จะเปลี่ยนความถี่ของแรงดันตั้งแต่ 50Hz 100Hz 500Hz 1000Hz และ 2000Hz ตามลำดับ

4) การศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าภายใต้สภาวะความเครียดทางไฟฟ้าและความเครียดทางความร้อน โดยใช้สัญญาณรูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยมพิกัดแรงดัน 8 kV ความถี่ของแรงดันตั้งแต่ 50Hz 100Hz 500Hz 1000Hz และ 2000Hz ตามลำดับ และศึกษาวิจัยที่อุณหภูมิ 60°C 75°C และ 90°C ตามลำดับ

อุณหภูมิในการทดสอบที่ 60°C เป็นค่าอุณหภูมิขณะการทำงานของสายเคเบิล (ในระบบจะมีค่าอุณหภูมิการทำงานอยู่ที่ 50°C – 60°C) 75°C เป็นค่าอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งานของสายเคเบิลไฟฟ้าที่มี PE เป็นฉนวน และ 90°C เป็นค่าอุณหภูมิสูงสุดขณะใช้งานของสายเคเบิลไฟฟ้าที่มี XLPE เป็นฉนวน วัตถุประสงค์ของการจำลองอุณหภูมิจากการศึกษาและวิจัยให้อยู่ในหลายกรณี ก็เพื่อศึกษาความคงทนของฉนวนสายเคเบิล และเปรียบเทียบการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าของสายเคเบิลในสภาวะต่าง ๆ เปลี่ยนรูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการศึกษาและวิจัย รูปคลื่นไซน์ และรูปคลื่นสามเหลี่ยม เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้น การศึกษาและวิจัยทริอิงในงานวิจัยนี้แสดงดังแผนผังในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 แผนผังการศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้า



## 5.4 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 5 นี้ได้กล่าวถึงการออกแบบชุดศึกษาและวิจัยทริองทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ขั้นตอนในการสร้างชุดศึกษาและวิจัยตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการศึกษาและวิจัยทริองทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ซึ่งประกอบด้วยการเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาและวิจัย วิธีการศึกษาและวิจัยทริองทางไฟฟ้าในสภาวะความเครียดต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบการเกิดทริองทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE ในสภาวะความเครียดต่าง ๆ

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบสร้าง และศึกษาวิจัยทริองทางไฟฟ้าเรียบร้อยแล้วในบทต่อไป ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการศึกษาและวิจัยทริองทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE เวลาในการเริ่มเกิดขยายตัว และสิ้นสุดการทดสอบเมื่อทริองทางไฟฟ้าขยายตัวออกไปประมาณมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของระยะระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง ข้อมูลรูปแบบของทริองทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE ที่เกิดขึ้นจากสภาวะต่าง ๆ ในการศึกษาวิจัย และขนาดของทริองทางไฟฟ้าแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะกล่าวถึงในบทที่ 6 ต่อไป



## บทที่ 6

### ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลทร้องทางไฟฟ้า

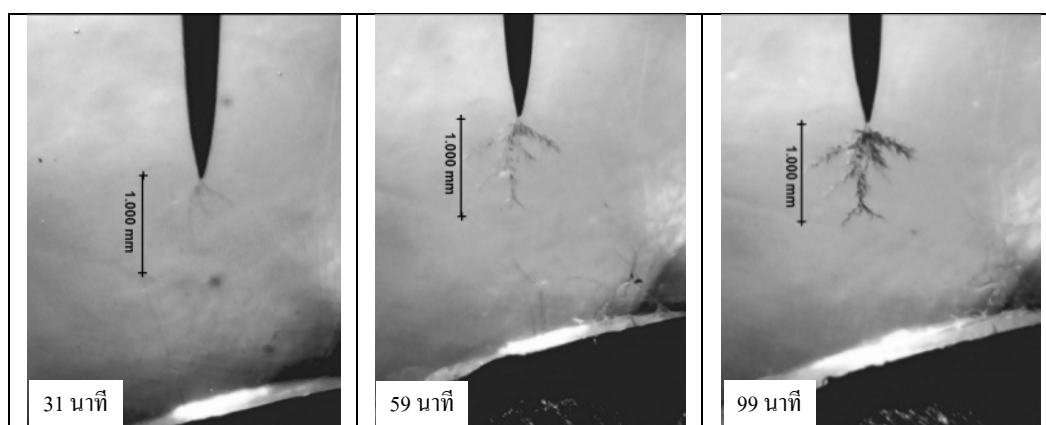
#### 6.1 กล่าวนำ

จากบทที่ 5 ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและวิจัยทร้องทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE ของสายเคเบิลใต้ดินระบบ 22 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในบทนี้ได้แสดงผลการศึกษาวิจัยที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE ศึกษารูปแบบลักษณะการเกิดทร้องทางไฟฟ้าโดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ ศึกษาผลของความถี่แรงดันที่มีต่อการเกิดทร้องทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเกิดทร้องทางไฟฟ้า ศึกษาผลของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่มีต่อการเกิดทร้องทางไฟฟ้า และจะมุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบ โครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่เกิดทร้องทางไฟฟ้า เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัย และศึกษาถึงการเกิดออกซิเดชัน การเกิดคาร์บอนในเซชันกับฉนวน XLPE โดยทำการเปรียบเทียบ โครงสร้างทางเคมีและทางกายภาพ ก่อนและหลังการเกิดทร้องทางไฟฟ้า

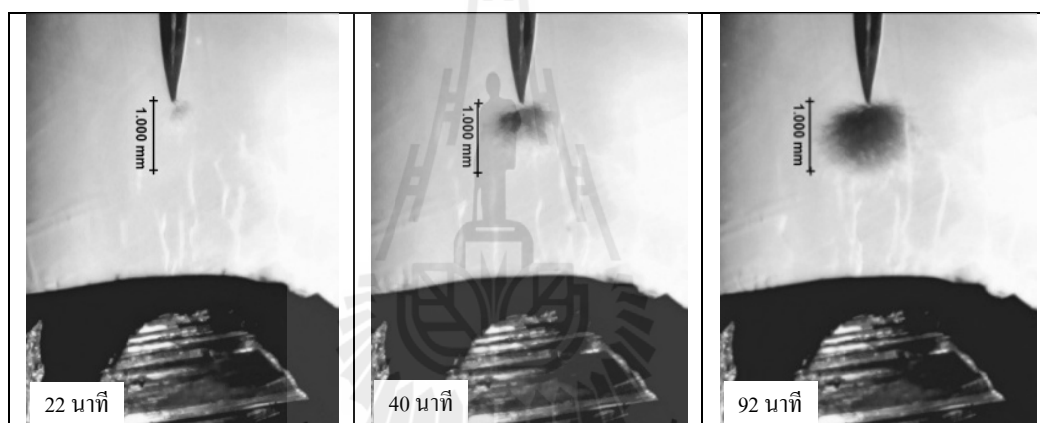
#### 6.2 รูปแบบของทร้องทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน XLPE

การศึกษาวิจัยทร้องทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ภายหลังจากการทดสอบ ทำการศึกษาลักษณะรูปแบบของทร้องที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน โดยทำการศึกษาการเกิดและขยายตัวของทร้องทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวน XLPE จากสภาวะต่าง ๆ ที่ทำการศึกษาวิจัย โดยใช้กล้องจุลทรรศน์บันทึกภาพระหว่างการศึกษาวิจัย

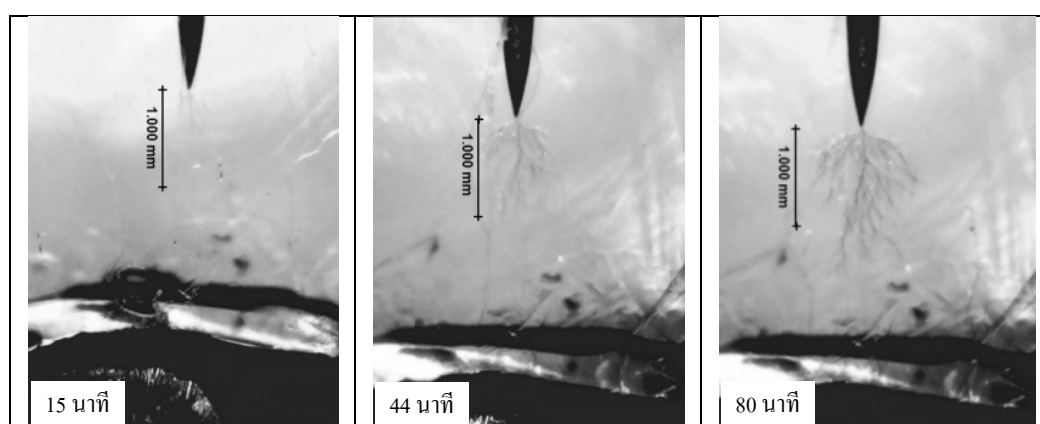
การศึกษาวิจัยทร้องทางไฟฟ้าจะใช้กล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS รุ่น SZX9 ตรวจสอบรูปแบบลักษณะของทร้องทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE จากสายเคเบิล 22 kV โดยบันทึกภาพเคลื่อนไหวไปตลอดการศึกษาวิจัย และทำการศึกษาการเกิดและขยายตัวของทร้องทางไฟฟ้า แบ่งเป็น 3 ระยะได้แก่ ระยะเริ่มเกิด ระยะขยายตัว และระยะขยายตัวเต็มที่ การศึกษาวิจัยทร้องทางไฟฟ้าโดยใช้รูปคลื่นแรงดันไซน์ และรูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม อุณหภูมิที่ 25°C 60°C 75°C และ 90°C ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ถึงรูปที่ 6.40



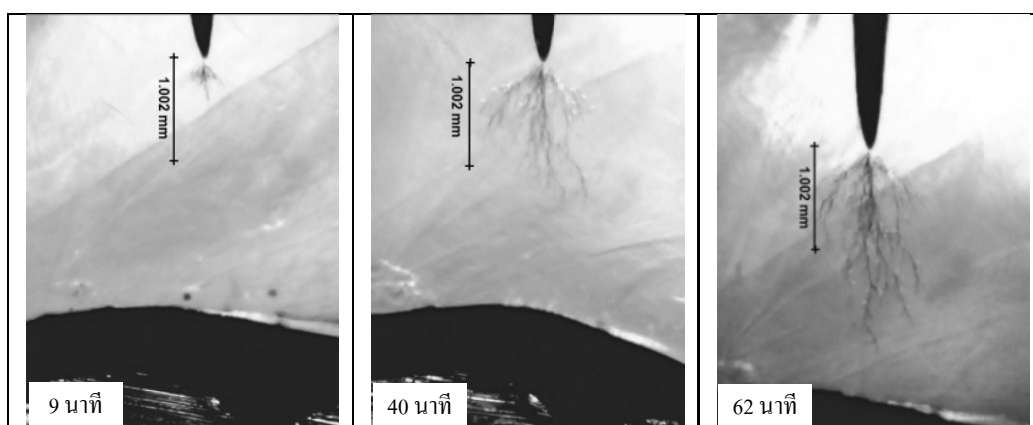
รูปที่ 6.1 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 50 Hz



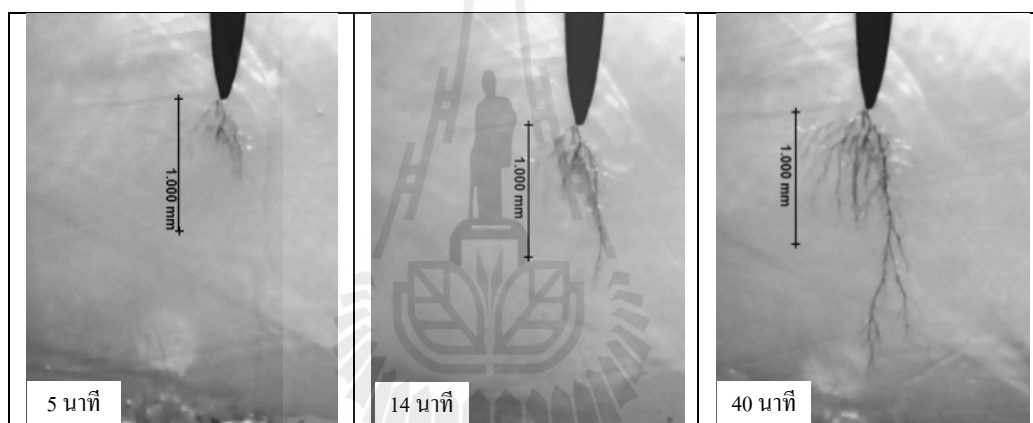
รูปที่ 6.2 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 100 Hz



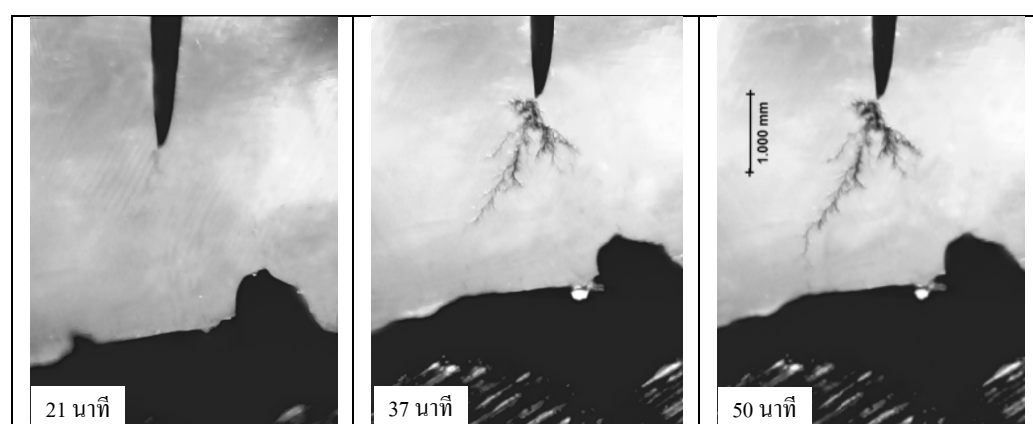
รูปที่ 6.3 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 500 Hz



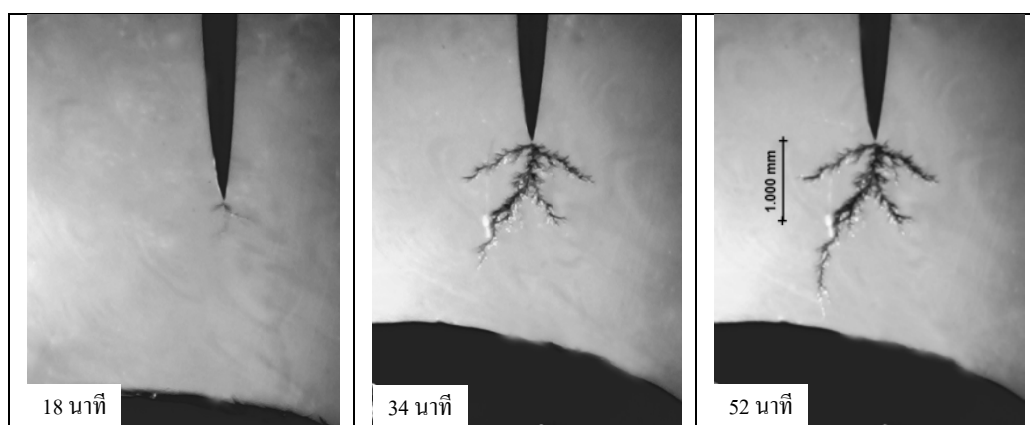
รูปที่ 6.4 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 1,000 Hz



รูปที่ 6.5 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 2,000 Hz



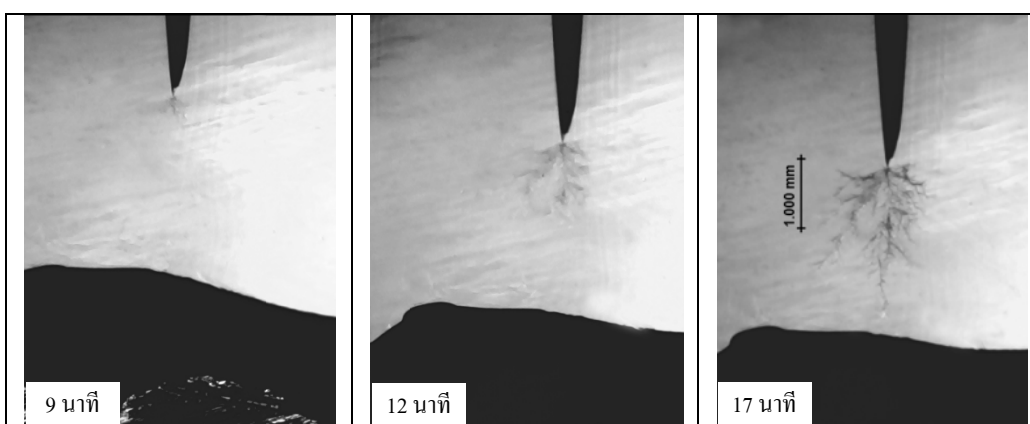
รูปที่ 6.6 ลักษณะการเกิดทริอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 50 Hz



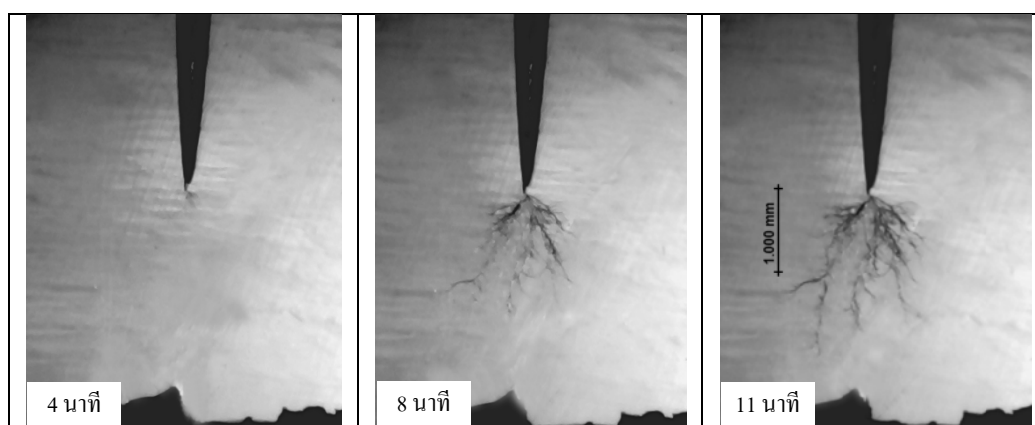
รูปที่ 6.7 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 100 Hz



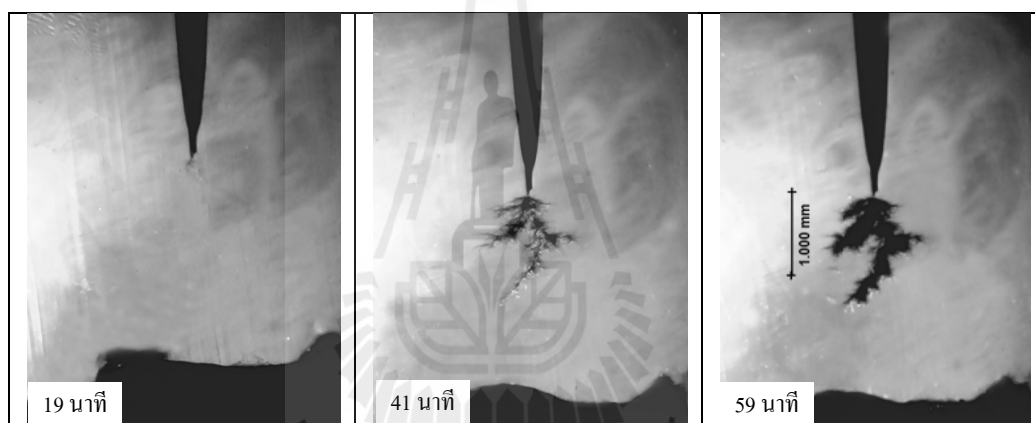
รูปที่ 6.8 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 500 Hz



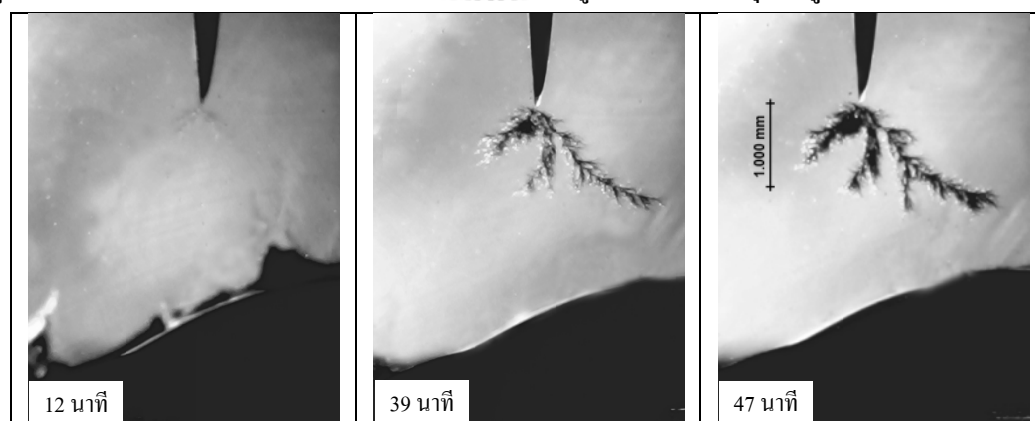
รูปที่ 6.9 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 1,000 Hz



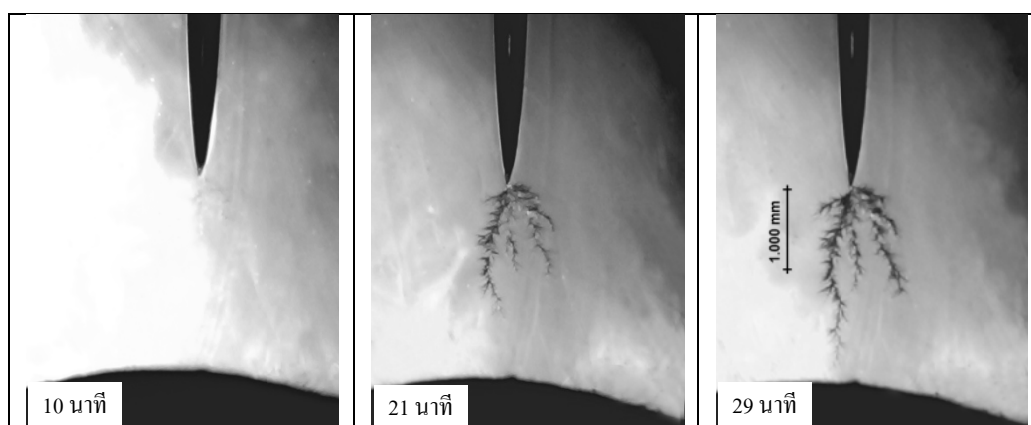
รูปที่ 6.10 ลักษณะการเกิดทรีอิง ป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 2,000 Hz



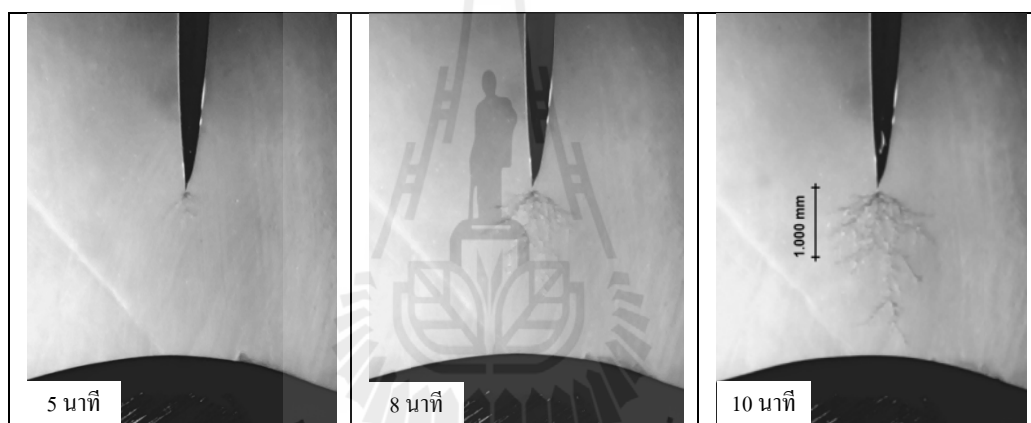
รูปที่ 6.11 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 50 Hz



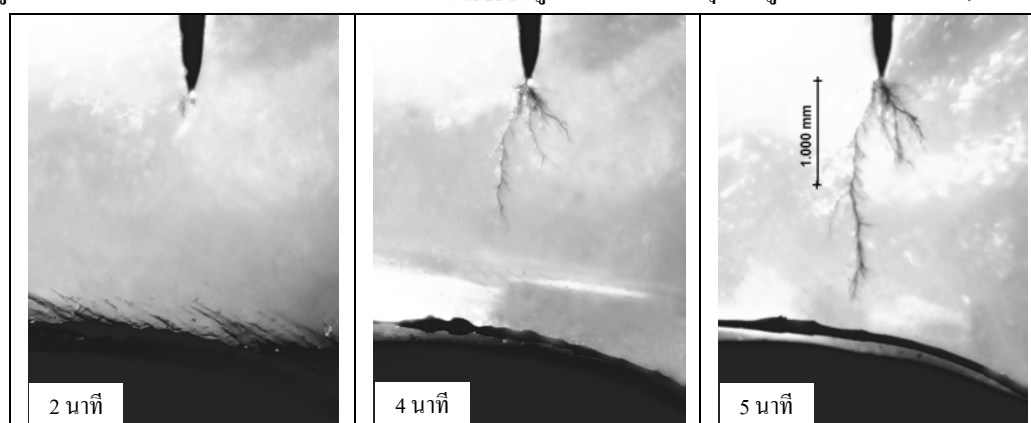
รูปที่ 6.12 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 100 Hz



รูปที่ 6.13 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 500 Hz



รูปที่ 6.14 ลักษณะการเกิดทรีอิงโดยป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 1,000 Hz



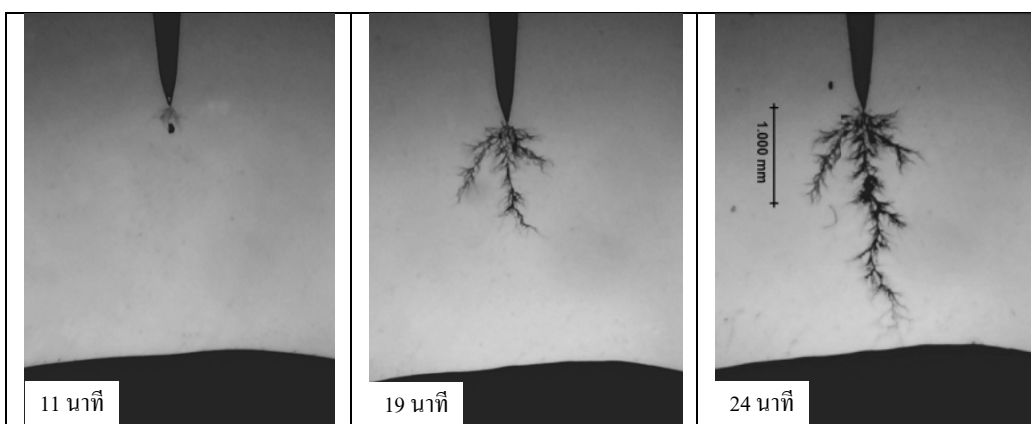
รูปที่ 6.15 ลักษณะการเกิดทรีอิงโดยป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 2,000 Hz



รูปที่ 6.16 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 50 Hz

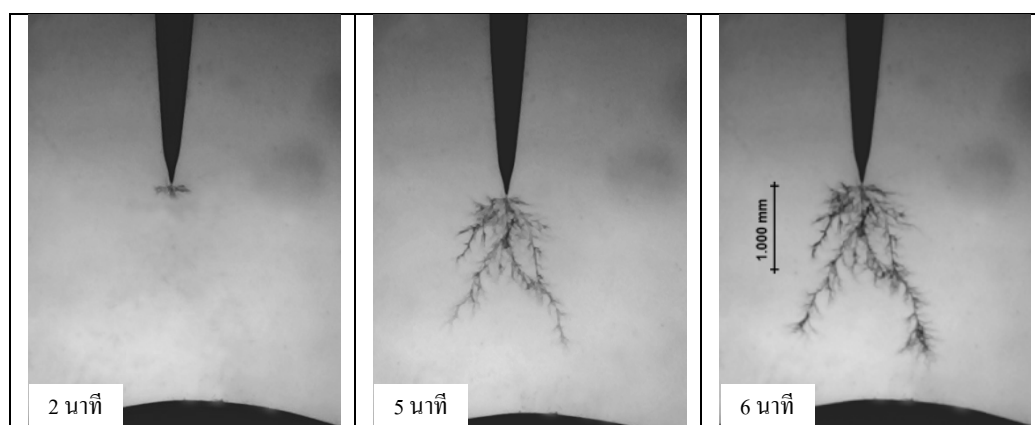


รูปที่ 6.17 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 100 Hz

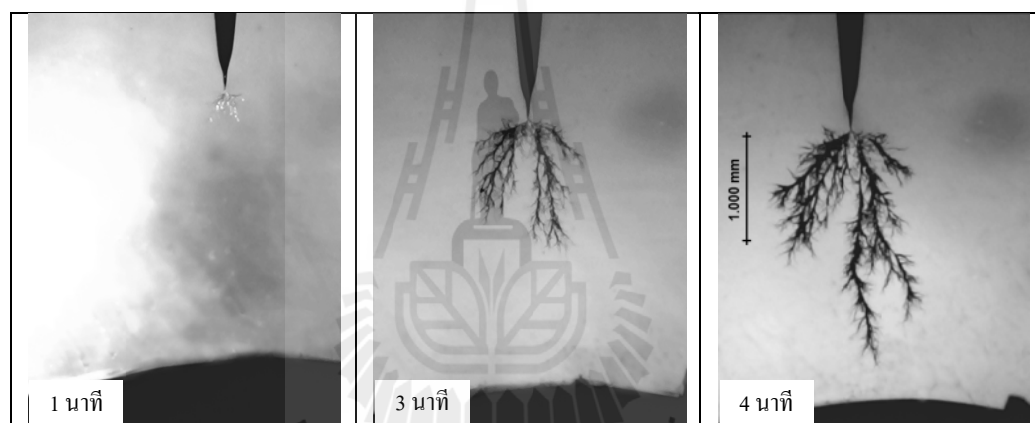


รูปที่ 6.18 ลักษณะการเกิดทรีอิงหลังจากป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 500 Hz

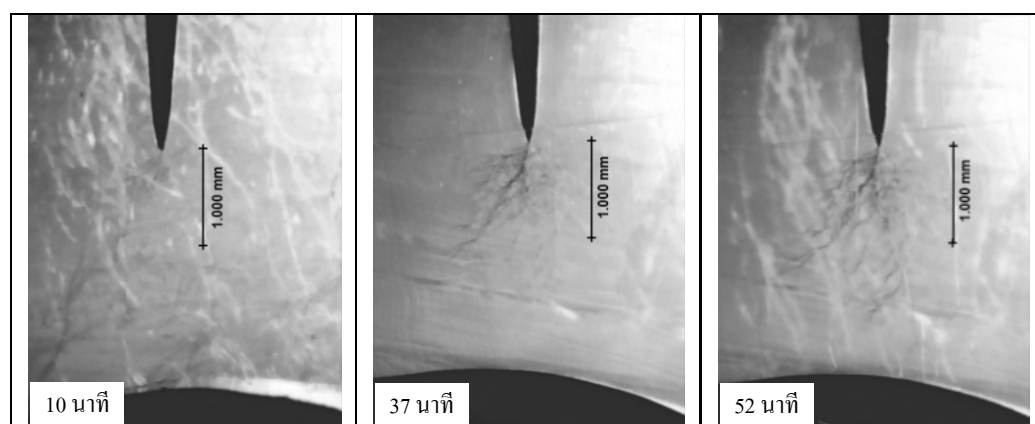




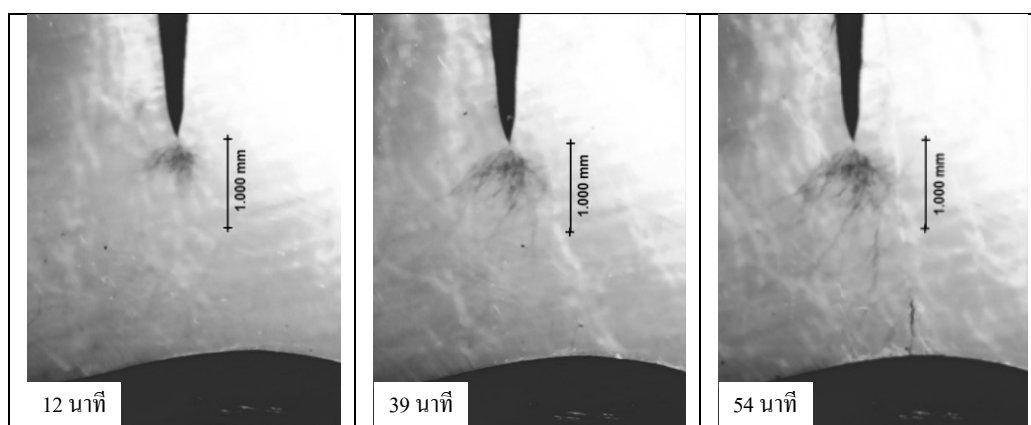
รูปที่ 6.19 ลักษณะการเกิดทรีอิงโดยป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 1,000 Hz



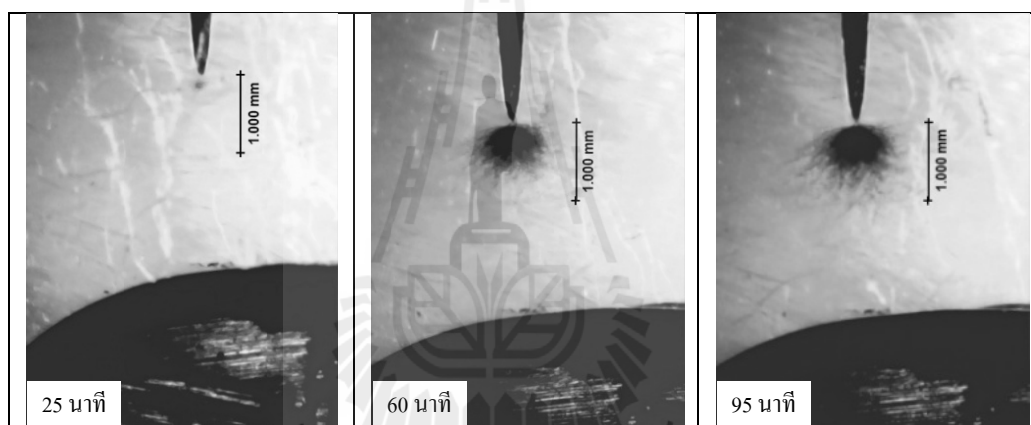
รูปที่ 6.20 ลักษณะการเกิดทรีอิงโดยป้อนแรงดันรูปคลื่นไซน์ ที่อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 2,000 Hz



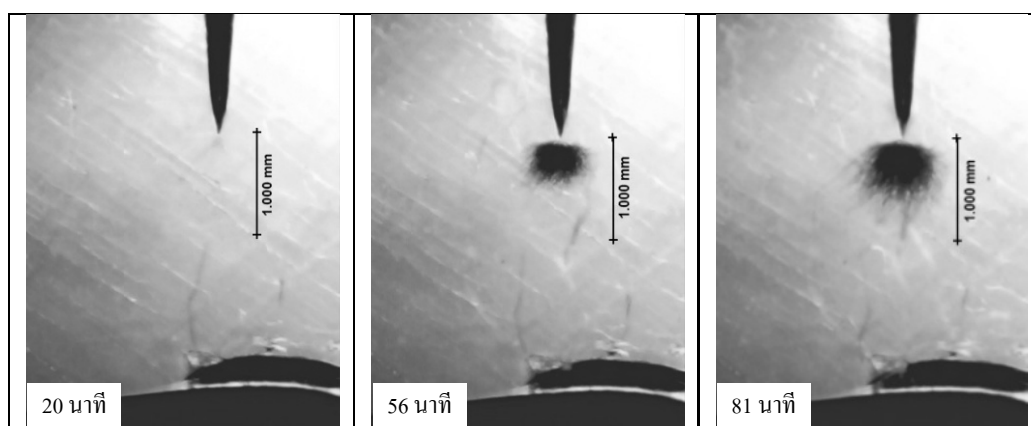
รูปที่ 6.21 ลักษณะการเกิดทรีอิงโดยป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 50 Hz



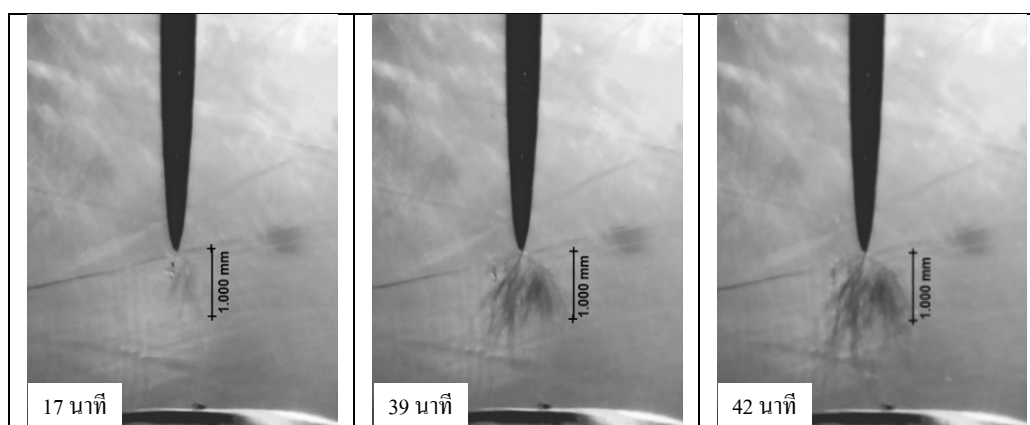
รูปที่ 6.22 ลักษณะการเกิดพลาสมาโดยป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 100 Hz



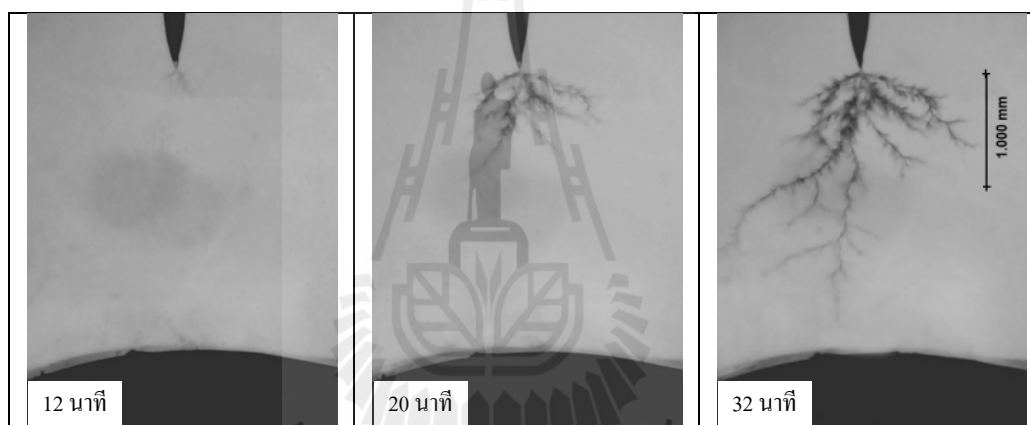
รูปที่ 6.23 ลักษณะการเกิดพลาสมาโดยป้อนแรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยมที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 500 Hz



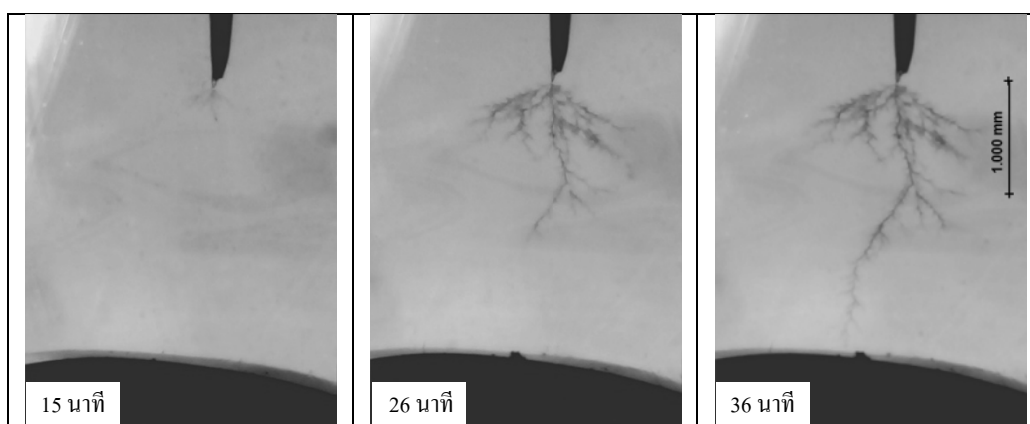
รูปที่ 6.24 ลักษณะการเกิดพลาสมาที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 1,000 Hz



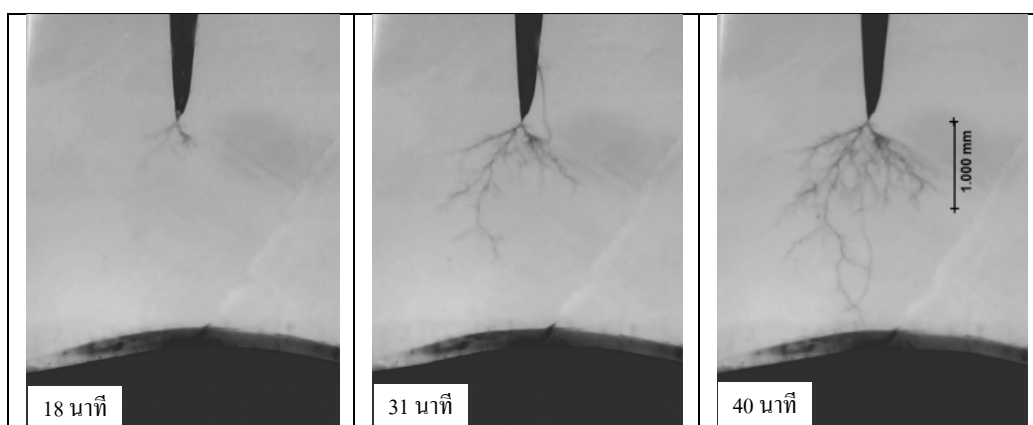
รูปที่ 6.25 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 2,000 Hz



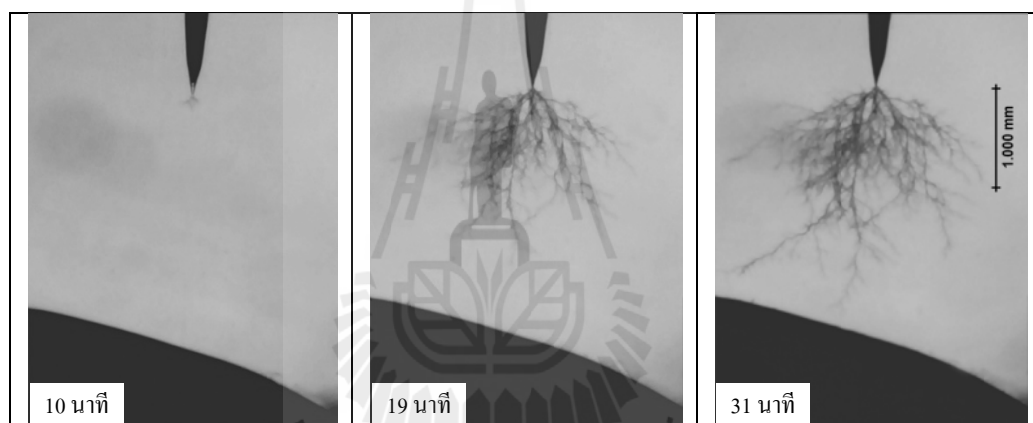
รูปที่ 6.26 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 50 Hz



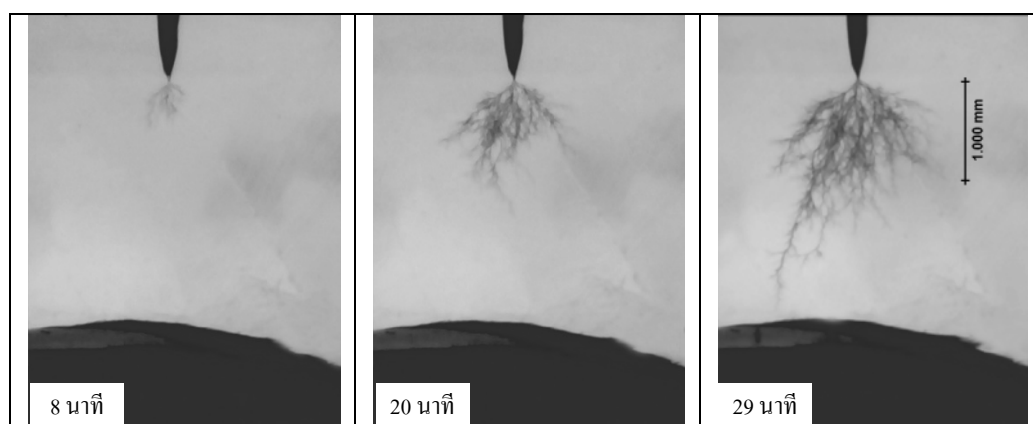
รูปที่ 6.27 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 100 Hz



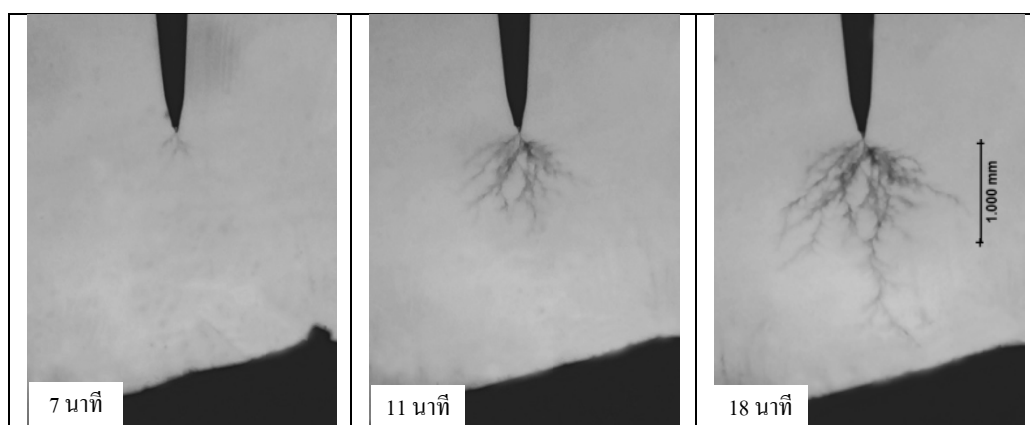
รูปที่ 6.28 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 500 Hz



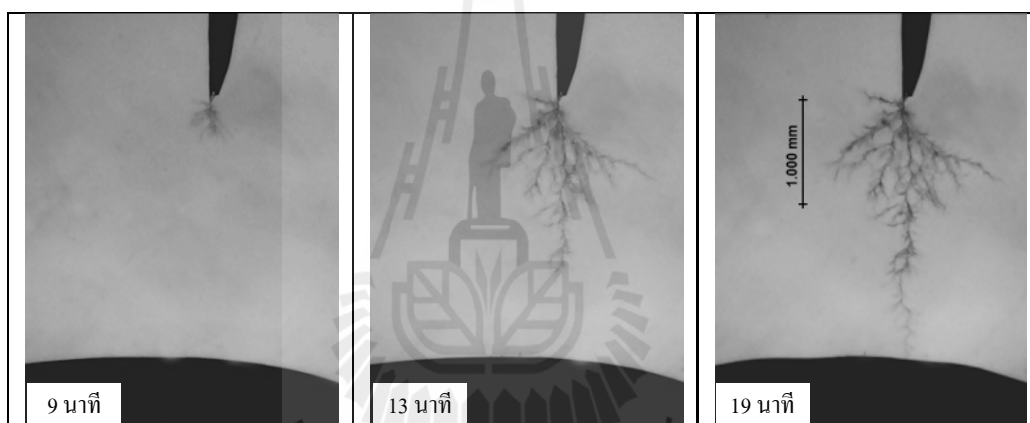
รูปที่ 6.29 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 1,000 Hz



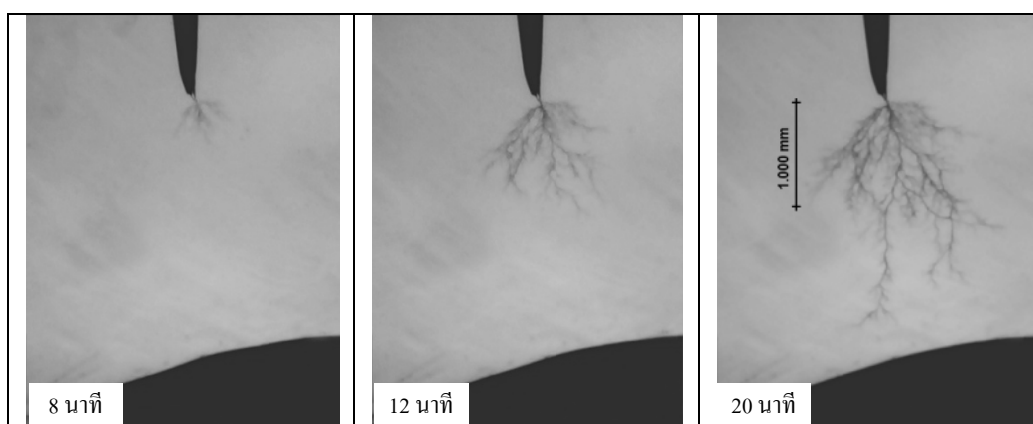
รูปที่ 6.30 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 60°C ความถี่ 2,000 Hz



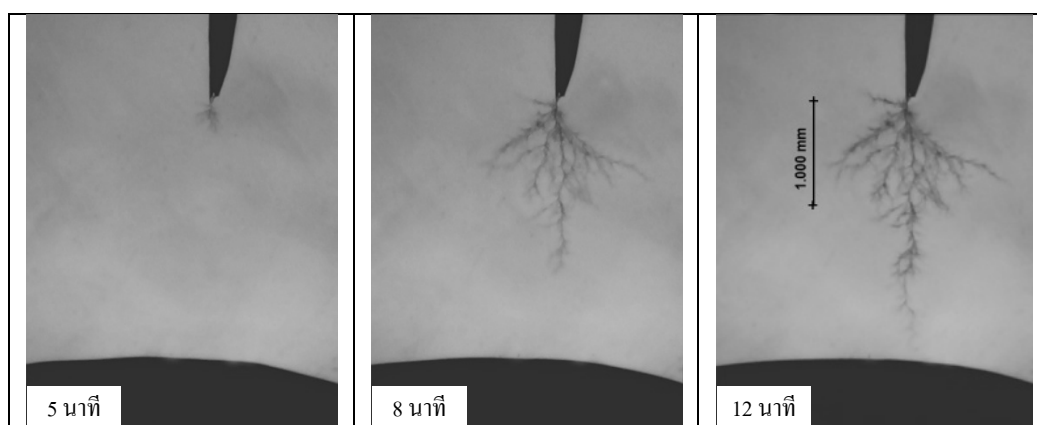
รูปที่ 6.31 ลักษณะการเกิดทรีอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 50 Hz



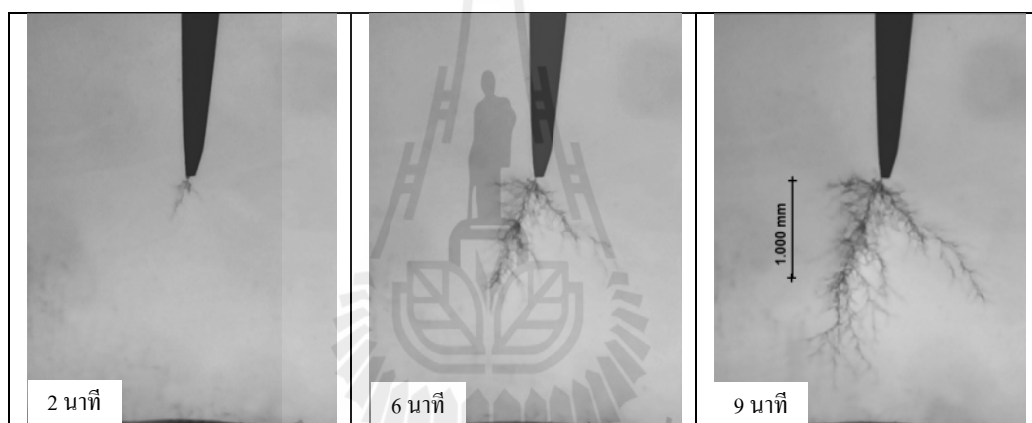
รูปที่ 6.32 ลักษณะการเกิดทรีอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 100 Hz



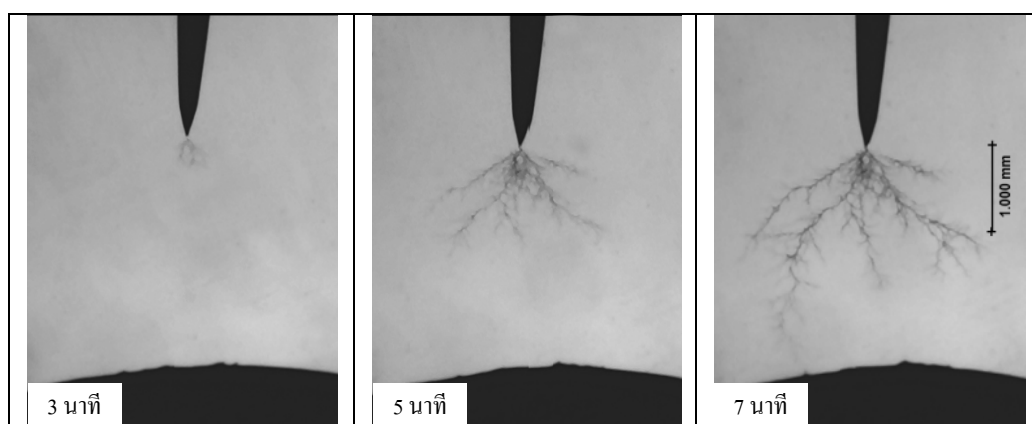
รูปที่ 6.33 ลักษณะการเกิดทรีอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 500 Hz



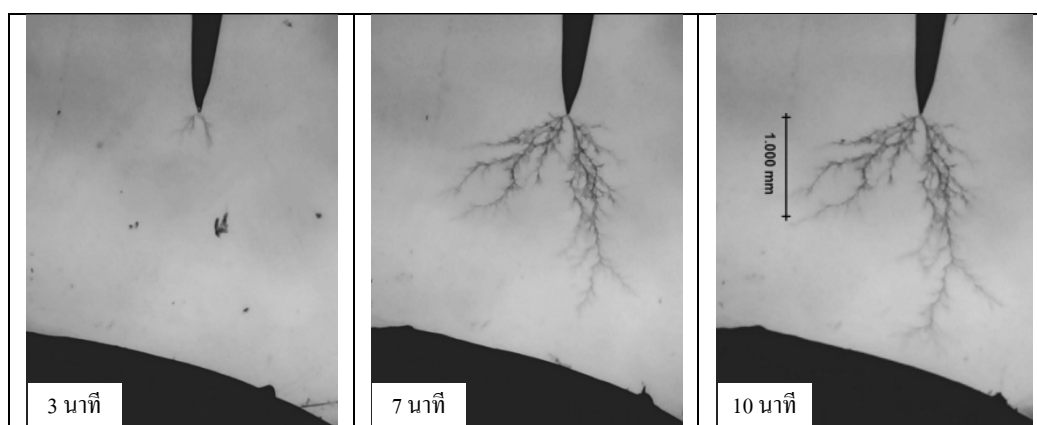
รูปที่ 6.34 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 1,000 Hz



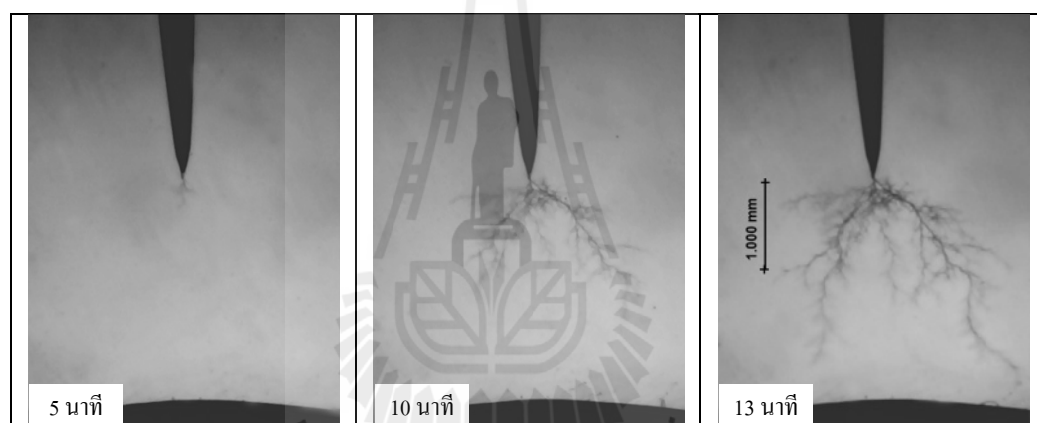
รูปที่ 6.35 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 75°C ความถี่ 2,000 Hz



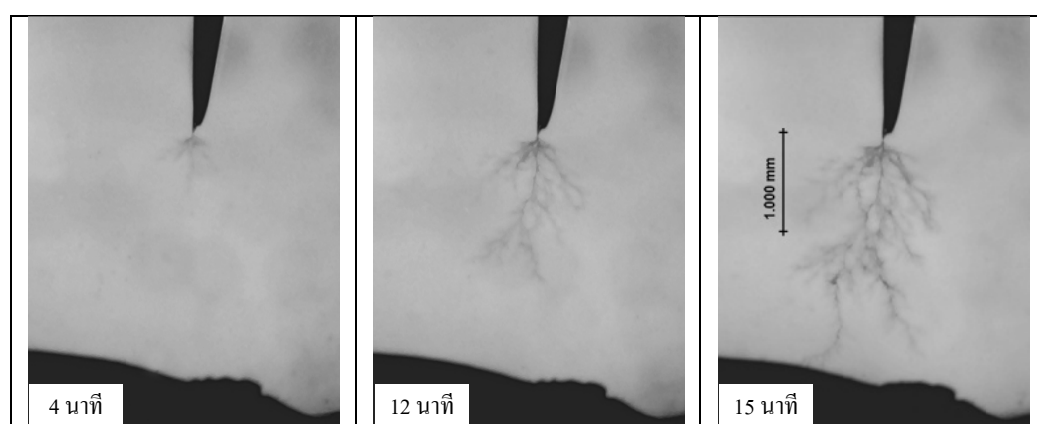
รูปที่ 6.36 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 50 Hz



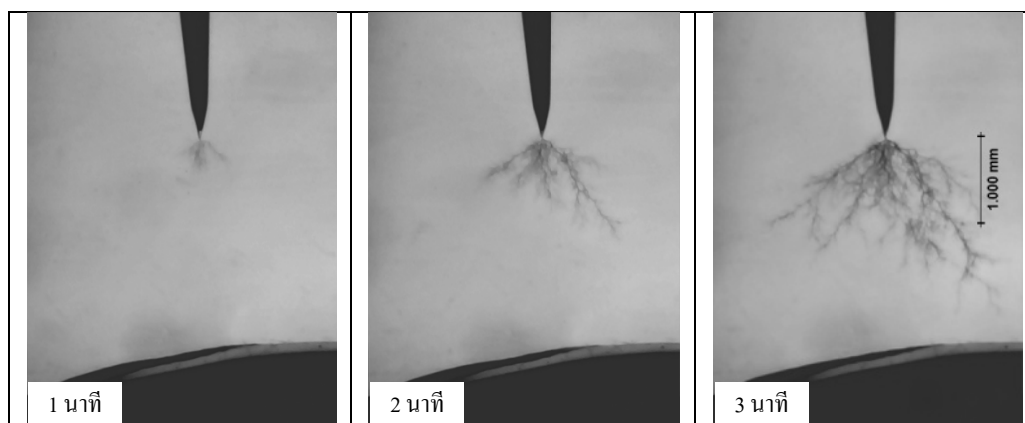
รูปที่ 6.37 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 100 Hz



รูปที่ 6.38 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 500 Hz



รูปที่ 6.39 ลักษณะการเกิดทริอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 1,000 Hz



รูปที่ 6.40 ลักษณะการเกิดทรีอิงที่แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม อุณหภูมิ 90°C ความถี่ 2,000 Hz

จากลักษณะรูปแบบของทรีอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื่อนนวน XLPE พบว่าทรีอิงที่ได้จากการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ทรีอิงทางไฟฟ้าที่มีการเกิดและขยายตัวอย่างช้า ๆ มีลักษณะคล้ายกับพุ่มไม้ เรียกทรีอิงทางไฟฟ้าชนิดนี้ว่าทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม และทรีอิงทางไฟฟ้าที่เกิดและขยายตัวอย่างรวดเร็วมีลักษณะคล้ายกับกิ่งไม้ รากไม้ เรียกทรีอิงทางไฟฟ้าชนิดนี้ว่าทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง

ทำการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ทรีอิงทางไฟฟ้าตามสภาวะที่ทำการศึกษาวิจัย ได้แก่ ศึกษาผลของความถี่แรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดและขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้า ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดและขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้า และศึกษาผลของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่มีผลต่อการเกิดและขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้า โดยทำการบันทึกขนาดของทรีอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและระยะเวลาในการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้า นำค่าที่บันทึกมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของทรีอิงทางไฟฟ้าเทียบกับเวลาในการเกิดและขยายตัวเพื่อใช้เปรียบเทียบอัตราการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในสภาวะต่าง ๆ

### 6.2.1 ศึกษาผลของความถี่แรงดันไฟฟ้าที่มีผลต่อการเกิดและขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE

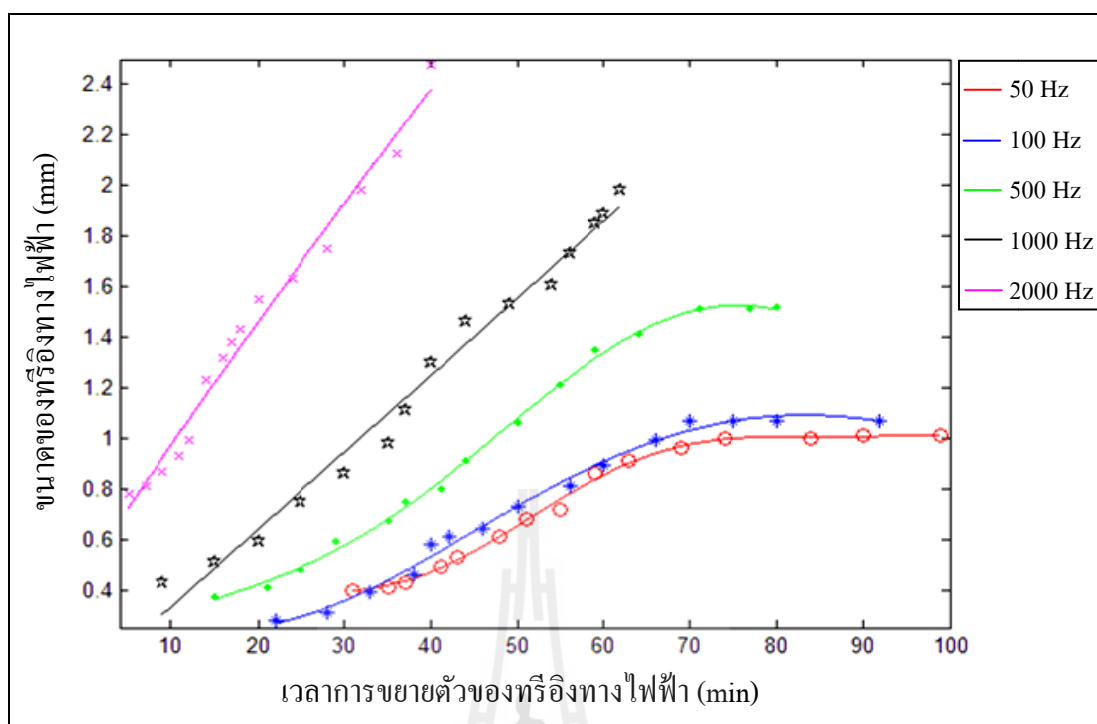
จากข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกขนาดการเกิดและการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าเทียบกับเวลาโดยใช้แรงดันทดสอบรูปคลื่นไซน์ พิกัดแรงดัน 8 kV ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 25°C ข้อมูลดังกล่าวแสดงในตารางที่ 6.1



ตารางที่ 6.1 การเกิดและการขยายตัวของทรีอิงเทียบกับเวลา ใช้รูปคลื่นแรงดันไซน์  
ที่อุณหภูมิ 25°C

50 Hz		100 Hz		500 Hz		1,000 Hz		2,000 Hz	
ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)
0.40	31	0.28	22	0.37	15	0.43	9	0.78	5
0.41	35	0.31	28	0.41	21	0.51	15	0.81	7
0.43	37	0.39	33	0.48	25	0.59	20	0.87	9
0.49	41	0.46	38	0.59	29	0.75	25	0.93	11
0.53	43	0.58	40	0.67	35	0.86	30	0.99	12
0.61	48	0.61	42	0.75	37	0.98	35	1.23	14
0.68	51	0.64	46	0.80	41	1.11	37	1.32	16
0.72	55	0.73	50	0.91	44	1.30	40	1.38	17
0.86	59	0.81	56	1.06	50	1.46	44	1.43	18
0.91	63	0.89	60	1.21	55	1.53	49	1.55	20
0.96	69	0.99	66	1.35	59	1.61	54	1.63	24
1.00	74	1.07	70	1.41	64	1.73	56	1.75	28
1.00	84	1.07	75	1.51	71	1.85	59	1.98	32
1.01	90	1.07	80	1.51	77	1.89	60	2.13	36
1.01	99	1.07	92	1.52	80	1.98	62	2.48	40

จากข้อมูลที่ได้จากตารางมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดและขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าเทียบกับเวลา แสดงดังรูปที่ 6.41



รูปที่ 6.41 เปรียบเทียบการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื่อนวนเทียบกับเวลา ที่อุณหภูมิ 25°C โดยใช้รูปคลื่นแรงดันไซน์

จากรูปที่ 6.41 จะเห็นว่าในการทดสอบใช้แรงดันรูปคลื่นไซน์เหมือนกันแต่ความถี่ต่างกันจะมีอัตราการเกิดและการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยรูปคลื่นแรงดันไซน์ความถี่ 50 Hz เวลาเริ่มเกิดทรีอิงทางไฟฟ้าที่ 31 นาที่ และขนาดของทรีอิงทางไฟฟ้าอยู่ที่ 1.01 mm สิ้นสุดการทดสอบใช้เวลา 99 นาที่ในลักษณะเดียวกันที่ความถี่ 2000 Hz เวลาเริ่มเกิด ทรีอิงทางไฟฟ้าอยู่ที่ 5 นาที่ และขนาดของทรีอิงทางไฟฟ้าอยู่ที่ 2.48 mm สิ้นสุดการทดสอบใช้เวลา 40 นาที่ จากทั้ง 2 กรณีจะเห็นว่า การขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงดัน โดยที่ความถี่สูงขึ้นอัตราการเกิดและการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย

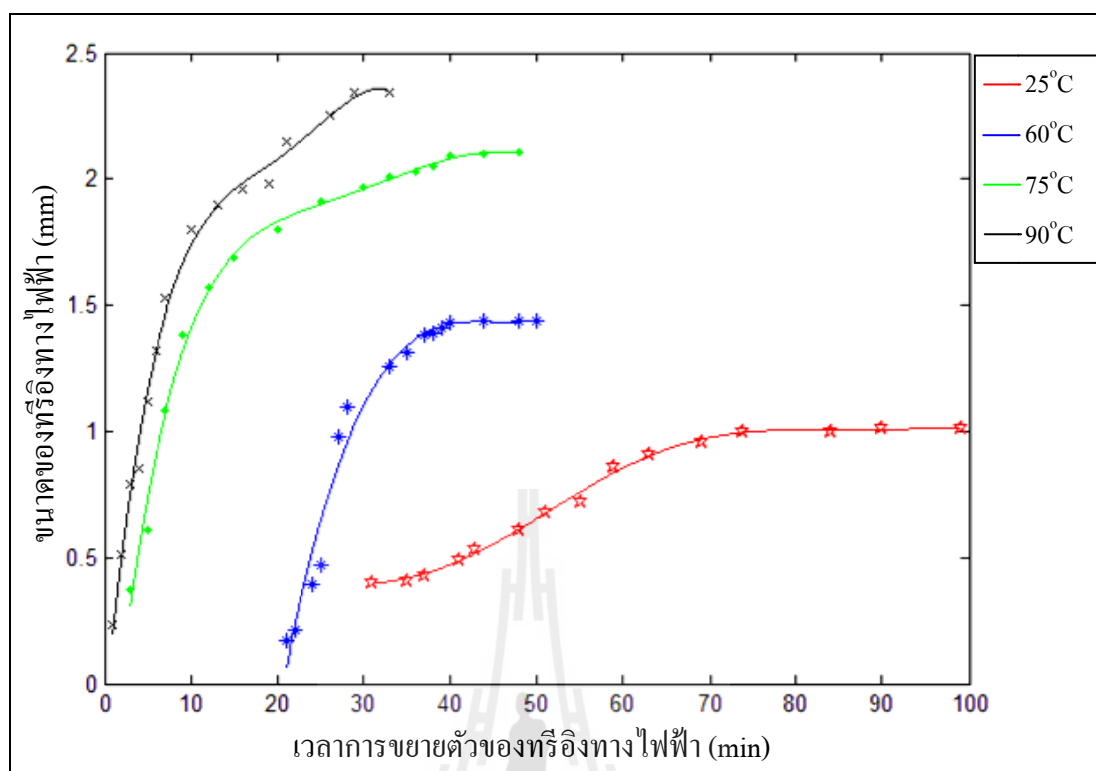
## 6.2.2 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดและการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้า

จากข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกขนาดการเกิด และการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าเทียบกับเวลาโดยใช้แรงดันรูปคลื่นไซน์ พิกัดแรงดัน 8 kV ความถี่ของแรงดันที่ 50 Hz ทำการวิจัยที่อุณหภูมิห้อง 60°C 75°C และ 90°C ข้อมูลดังกล่าวแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ขนาดการเกิด และการขยายตัวของทรีอิงเทียบกับเวลาโดยใช้แรงดันรูปคลื่นไซน์  
ความถี่ 50 Hz ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

25°C		60°C		75°C		90°C	
ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)
0.40	31	0.17	21	0.37	3	0.23	1
0.41	35	0.21	22	0.61	5	0.51	2
0.43	37	0.39	24	1.08	7	0.79	3
0.49	41	0.47	25	1.38	9	0.85	4
0.53	43	0.98	27	1.67	12	1.12	5
0.61	48	1.10	28	1.75	15	1.62	6
0.68	51	1.26	33	1.80	20	1.73	7
0.72	55	1.31	35	1.91	25	1.80	10
0.86	59	1.38	37	1.95	30	1.90	13
0.91	63	1.39	38	2.01	33	1.93	16
0.96	69	1.41	39	2.03	36	1.98	19
1.00	74	1.43	40	2.05	38	2.10	21
1.00	84	1.44	44	2.09	40	2.25	26
1.01	90	1.44	48	2.10	44	2.34	29
1.01	99	1.44	50	2.11	48	2.34	33

นำข้อมูลที่ได้จากตารางมาพล็อตกราฟการเกิดและขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าเทียบกับ  
เวลาแสดงดังรูปที่ 6.42



รูปที่ 6.42 เปรียบเทียบการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเทียบกับเวลาแรงดัน  
รูปคลื่นสัญญาณไซน์ความถี่ของแรงดัน 50 Hz โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 6.42 จะเห็นว่าที่แรงดันรูปคลื่นชนิดเดียวกัน ความถี่ของแรงดัน 50 Hz เท่ากัน แต่วางกันที่อุณหภูมิอัตราการเกิดและการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยที่อุณหภูมิ 25°C ทรีอิงทางไฟฟ้าเริ่มเกิดที่เวลา 31 นาทีและขนาดของทรีอิงทางไฟฟ้าอยู่ที่ 1.01 mm สิ้นสุดการทดสอบใช้เวลา 99 นาที แต่ในขณะที่อุณหภูมิ 90°C ทรีอิงทางไฟฟ้าเริ่มเกิดที่เวลา 1 นาทีและขนาดของทรีอิงทางไฟฟ้าอยู่ที่ 2.34 mm สิ้นสุดการทดสอบใช้เวลา 33 นาที จากทั้ง 2 กรณีพบว่า การขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบ โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดและการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย

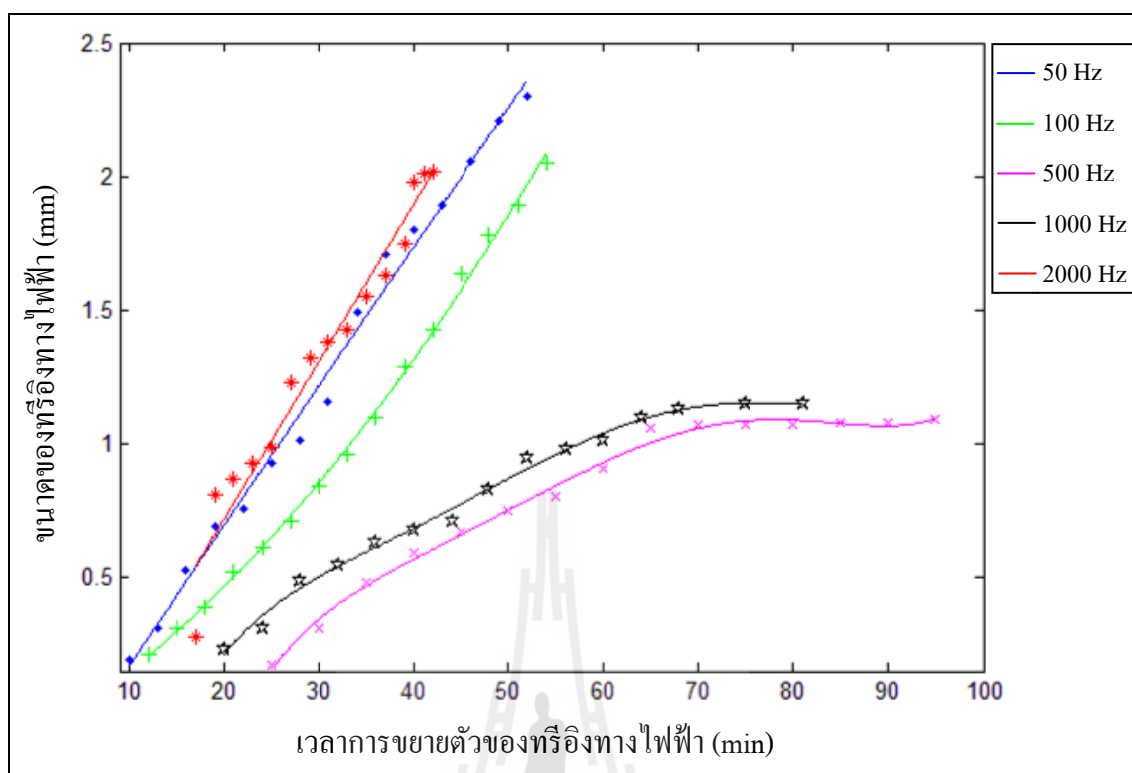
### 6.2.3 ศึกษาผลของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่มีผลต่อการเกิดและการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้า

ในการศึกษาวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าใช้สัญญาณรูปคลื่นแรงดัน 2 แบบด้วยกันคือ สัญญาณรูปคลื่นไซน์และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม เพื่อศึกษาทรีอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรูปคลื่นดังกล่าวว่าจะมีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด จากข้อมูลที่ได้ทำการบันทึกขนาดการเกิด และการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าเทียบกับเวลา ข้อมูลดังกล่าวแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ขนาดการเกิด และการขยายตัวของทรีอิงเทียบกับเวลา ใช้รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C

50Hz		100Hz		500Hz		1000Hz		2000Hz	
ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)	ขนาด (mm)	เวลา (min)
0.19	10	0.21	12	0.17	25	0.23	20	0.28	17
0.31	13	0.31	15	0.31	30	0.31	24	0.81	19
0.53	16	0.39	18	0.48	35	0.49	28	0.87	21
0.69	19	0.52	21	0.59	40	0.55	32	0.93	23
0.76	22	0.61	24	0.67	45	0.63	36	0.99	25
0.93	25	0.71	27	0.75	50	0.68	40	1.23	27
1.01	28	0.84	30	0.80	55	0.71	44	1.32	29
1.16	31	0.96	33	0.91	60	0.83	48	1.38	31
1.49	34	1.10	36	1.06	65	0.95	52	1.43	33
1.71	37	1.29	39	1.07	70	0.98	56	1.55	35
1.80	40	1.43	42	1.07	75	1.01	60	1.63	37
1.89	43	1.64	45	1.07	80	1.10	64	1.75	39
2.06	46	1.78	48	1.08	85	1.13	68	1.98	40
2.21	49	1.89	51	1.08	90	1.15	75	2.01	41
2.30	52	2.05	54	1.09	95	1.15	81	2.02	42

นำข้อมูลที่ได้จากตารางมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดและขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าเทียบกับเวลาของรูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 6.43 และเปรียบเทียบการเกิดและการขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้า ระหว่างรูปคลื่นแรงดันไซน์และรูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 6.44



รูปที่ 6.43 การขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวนโดยใช้รูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม ที่อุณหภูมิ 25°C

จากรูปที่ 6.43 การเกิดและขยายตัวของทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวน XLPE แรงดันรูปคลื่นสามเหลี่ยม พบว่าลักษณะของทรีอิงทางไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำ (50 Hz และ 100 Hz) จะเกิดขึ้นและขยายตัวอย่างรวดเร็ว มีการแตกกิ่งก้านสาขามากคือทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง หากไม่หยุดการทดสอบอาจจะเกิดเบรกดาวน์ในเนื้อฉนวน และที่ความถี่ 500 Hz และ 1000 Hz ทรีอิงที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะการขยายตัวอย่างช้า มีการแตกกิ่งก้านสาขาน้อย (ทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม)

### 6.3 การเกิดออกซิเดชันและการบอบในเซชันจากทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE

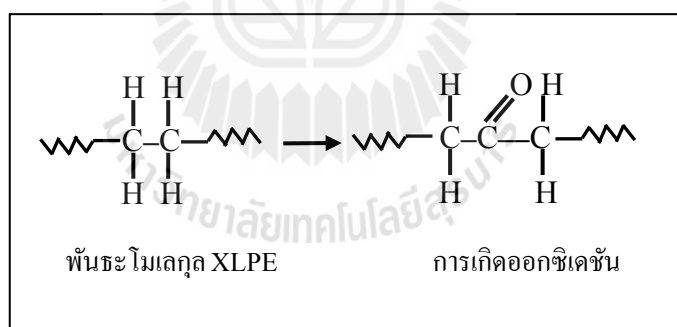
การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการทดสอบทรีอิงทางไฟฟ้า จะทำการตรวจสอบการเกิดออกซิเดชันและการเกิดคาร์บอนในเซชันแก่ฉนวน XLPE อันเป็นผลจากการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวนเคลือบ XLPE และการเกิดการเผาไหม้ในฉนวน XLPE ซึ่งปริมาณการเกิดกระบวนการทั้งสองนี้สามารถบ่งชี้การเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ได้เป็นอย่างดี

### 6.3.1 การเกิดออกซิเดชันบนฉนวน XLPE

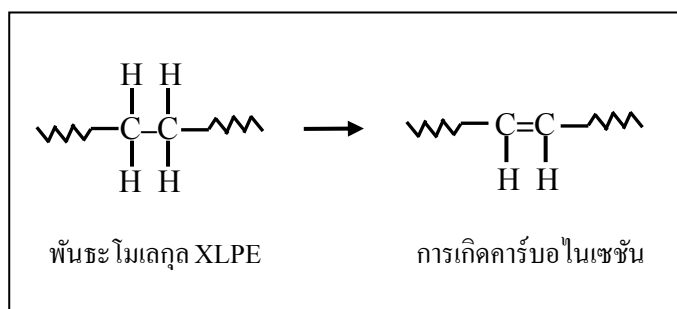
ออกซิเดชัน คือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้สารรับธาตุออกซิเจนมารวมตัวเข้าด้วยกัน หรือทำให้สารสูญเสียธาตุไฮโดรเจนไป และปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้อะตอมของธาตุสูญเสียอิเล็กตรอนไป การเกิดออกซิเดชันบนฉนวน XLPE ที่ทำการศึกษาวิจัยทีริอิ่งทางไฟฟ้าเกิดจากแรงดันไฟฟ้า ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าและความร้อนเป็นระยะเวลานานแก่ฉนวน XLPE ทำให้พันธะโมเลกุลของฉนวน XLPE เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการจับพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นคาร์บอนและออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 6.45 ซึ่งส่งผลให้ฉนวน XLPE มีประสิทธิภาพในความเป็นฉนวนลดลง

### 6.3.2 การเกิดคาร์บอนในฉนวน XLPE

คาร์บอนในฉนวน คือ กระบวนการเปลี่ยนสภาพจากวัตถุต่าง ๆ ให้เป็นธาตุคาร์บอน (Carbon) การเกิดคาร์บอนในฉนวน XLPE ที่ทำการศึกษาวิจัยทีริอิ่งทางไฟฟ้าเกิดจากการเผาไหม้ด้วยแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิความร้อนเป็นระยะเวลานานเช่นเดียวกับการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้พันธะโมเลกุลของไฮโดรเจนในฉนวน XLPE หลุดออกไปและเปลี่ยนสภาพเป็นพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนและคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 6.46 ซึ่งส่งผลให้ฉนวน XLPE มีประสิทธิภาพในความเป็นฉนวนลดลงเช่นเดียวกัน



รูปที่ 6.45 พันธะ โมเลกุลของ XLPE ในการเกิดออกซิเดชัน



รูปที่ 6.46 พันธะโมเลกุลของ XLPE ในการเกิดคาร์บอนในเซชัน

#### 6.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE

การเปรียบเทียบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่เสื่อมอายุระหว่างฉนวนที่เกิดทรื่องทางไฟฟ้าและฉนวนที่ไม่เกิดทรื่องทางไฟฟ้า (สายเคเบิลใหม่) จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR) ดังแสดงในรูปที่ 6.47 การหลักทำงานและวิธีการใช้งานของเครื่อง FTIR อธิบายดังนี้

##### 6.4.1 เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี

FTIR ให้ข้อมูลที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ ย่านอินฟราเรดในสเปกตรัมของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ประโยชน์มากที่สุดต่อนักเคมีอินทรีย์คือย่านความถี่ระหว่าง  $4,000\text{--}650\text{ cm}^{-1}$  ( $\text{cm}^{-1}$  เป็นหน่วยของจำนวนคลื่นต่อวินาที หรือเรียกว่า เลขคลื่น) และความยาวคลื่นระหว่าง  $2.5\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$  สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและเลขคลื่น คือ

$$\text{wavelength } (\mu\text{m}) = \frac{10,000}{\text{wavenumber } (\text{cm}^{-1})} \quad (6.1)$$

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นการพล็อตระหว่างความถี่ (เลขคลื่น  $\text{cm}^{-1}$ ) หรือความยาวคลื่น ( $\mu\text{m}$ ) และ Transmittance (%T) เป็นอัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง (Transmitted Radiation) และความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่างและความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่างคือ



$$\%T = \frac{I}{I_0} \quad (6.2)$$

โดยที่  $I$  = ความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลาง

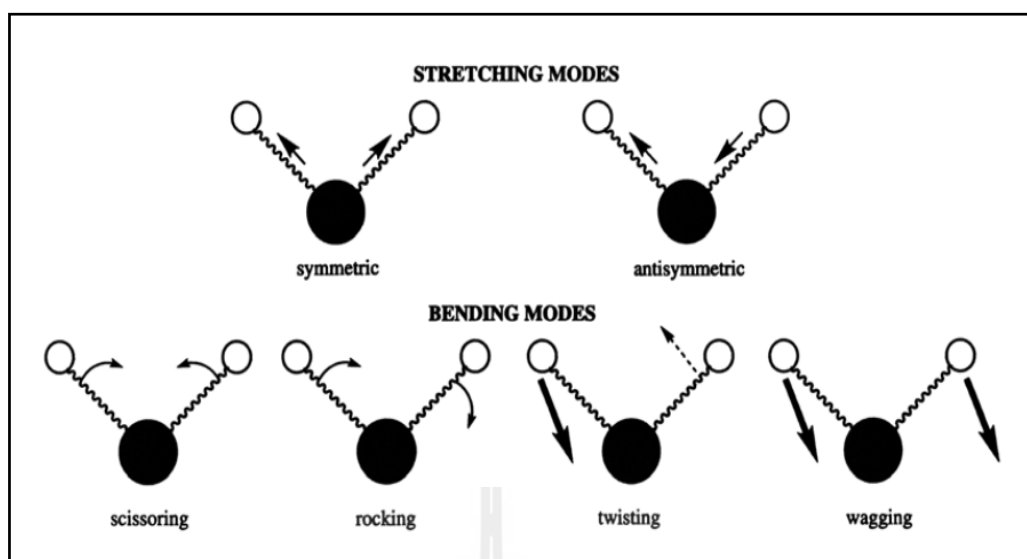
$I_0$  = ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบตัวกลาง

% Transmittance = 100 T

โดยทั่วไป แถบที่เกิดใน IR สเปกตรัม เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐาน ได้แก่ การยืดและการงอ ยังมีแถบที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้เรียกว่า Overtone ซึ่งเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูง บางครั้งอาจมีแถบเกิดที่ความถี่ที่เป็นผลบวกหรือผลต่างของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้เรียกว่า Combination Bands ถ้า Overtone หรือ Combination bands เกิดใกล้กับแถบพื้นฐาน ผลก็คือทำให้ความเข้มของแถบพื้นฐานลดลง แต่ไปเพิ่มความเข้มของ Overtone และ Combination Bands ปรากฏการณ์นี้ คือเกิด Fermi Resonance และพืด บางครั้งเรียกว่า Fermi Doublet รูปที่ 6.48 แสดงการสั่นแบบพื้นฐานของหมู่  $\text{CH}_2$



รูปที่ 6.47 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี



รูปที่ 6.48 การสั่นแบบพื้นฐานของหมู่  $\text{CH}_2$  (ที่มา : <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf>)

เครื่องมือวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี หรือเครื่อง FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ เทคนิคนี้เป็นวิธีการทางสเปกโตรสโกปีที่ศึกษาการดูดกลืนแสงของสารในย่านความถี่ของแสง โดยการวิเคราะห์โครงสร้างสารจะอาศัยการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันของแต่ละโมเลกุล ซึ่งโมเลกุลแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 6.4 การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของวัสดุด้วยคลื่นแสงอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคลื่นคือ การส่องแบบใช้แสงอินฟราเรดระดับสูง จะใช้ช่วงคลื่นที่  $14000\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$  เพื่อใช้หาการเปลี่ยนแปลงของ Harmonic และ Overtone เช่น การส่องแบบใช้แสงอินฟราเรดระดับกลาง จะใช้ช่วงคลื่นที่  $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  เพื่อใช้หาโครงสร้างของวัสดุต่าง ๆ และการส่องแบบใช้แสงอินฟราเรดระดับต่ำ จะใช้ช่วงคลื่นที่  $400\text{--}10\text{ cm}^{-1}$  เพื่อใช้หาขอบเขตและพื้นที่ของคลื่นไมโครเวฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงคลื่น  $1500\text{--}400\text{ cm}^{-1}$  เป็นช่วง Fingerprint Region ซึ่งจะมีลักษณะของสเปกตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว แต่เนื่องจากจะมีพิกัดค่อนข้างเยอะ ดังนั้นการวิเคราะห์สเปกตรัมในช่วงนี้จึงค่อนข้างยาก วิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับด้านวัสดุศาสตร์ เช่น ช่วยในการจำแนกชนิดของพอลิเมอร์ และในด้านอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเทคนิคนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างไม่แพงและรวมไปถึงชนิดของตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์วัสดุได้เกือบทุกชนิด

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการศึกษาวิจัยหรือทางไฟฟ้าจะใช้เครื่อง FTIR ทำการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่างด้วยพลังงานช่วงแสง

อินฟราเรดขนาดกลาง โดยมีช่วงคลื่นตัวเลข ตั้งแต่  $3600\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$  โดยใช้วิธีส่องผ่านทะลุตัวสาร เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์คือชิ้นงานฉนวน XLPE ที่มีความหนา  $60\text{ }\mu\text{m}$  โดยใช้เครื่องมือโครโทรมในการตัดชิ้นงานฉนวนในบริเวณที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้าให้ได้ความหนาเท่ากับ  $60\text{ }\mu\text{m}$  ซึ่งสามารถให้แสงอินฟราเรดส่องทะลุผ่านตัวชิ้นงานได้จากค่าตารางที่ 6.4 ได้แสดงในช่วงคลื่นตัวเลข  $1600\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$  และ  $1750\text{--}1780\text{ cm}^{-1}$  โดยช่วงคลื่นที่  $1600\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$  จะแสดงการเกิดการเผาไหม้ของเนื้อฉนวน หากฉนวน XLPE ที่เกิดทริอิงในเนื้อฉนวนจากการเผาไหม้จะปรากฏพันธะ C=C ขึ้นที่โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE และช่วงคลื่น  $1750\text{--}1780\text{ cm}^{-1}$  จะแสดงการเกิดออกซิเดชันในเนื้อฉนวน

ในกรณีที่เนื้อฉนวนเกิดออกซิเดชันขึ้นจะปรากฏพันธะ C=O ขึ้น หากมีพันธะ C=C และ C=O ปรากฏมากแสดงว่าเนื้อฉนวน XLPE จะมีการเสื่อมอายุมากตามไปด้วยงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของเนื้อฉนวน XLPE ระหว่างฉนวน XLPE บริเวณที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้า และฉนวน XLPE ในบริเวณที่ไม่เกิดทริอิงทางไฟฟ้า (สายเคเบิลใหม่)

ตารางที่ 6.4 ความถี่ของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันบางชนิด (ที่มา: <http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf>)

Type of vibration		ช่วงคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	Intensity
Alkanes	$\text{CH}_3$ , $\text{CH}_2$ & $\text{CH}$ 2 or 3 Bands	2850–3000	str
Alkenes	$=\text{C-H}$ & $=\text{CH}_2$ (usually sharp)	3020–3100	med
	$\text{C=C}$ (symmetry reduces intensity)	1630–1680	var
	$\text{C=C}$ asymmetric stretch	1900–2000	str
Alkynes	$\text{C-H}$ (usually sharp)	3300	str
	$\text{C}\equiv\text{C}$ (symmetry reduces intensity)	2100–2250	var
Arenes	$\text{C-H}$ (may be several bands)	3030	var
	$\text{C=C}$ (in ring) (2 bands)	1600 and 1500	med-wk
	(3 if conjugated)		
Alcohols and Phenols	$\text{O-H}$ (free), usually sharp	3580–3650	var
	$\text{O-H}$ (H-bonded), usually broad	3200–3550	str
	$\text{C-O}$	970–1250	str

ตารางที่ 6.4 ความถี่ของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันบางชนิด (ต่อ)

Type of vibration		ช่วงคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	Intensity
Amines	N-H (2 bands)	3400–3500	wk
	N-H	3300–3400	wk
	C-N	1000–1250	med
Alkanes	$\text{CH}_3$ , $\text{CH}_2$ & $\text{CH}$ 2 or 3 Bands	2850–3000	str
Alkenes	$=\text{C-H}$ & $=\text{CH}_2$ (usually sharp)	3020–3100	med
	$\text{C}=\text{C}$ (symmetry reduces intensity)	1630–1680	var
	$\text{C}=\text{C}$ asymmetric stretch	1900–2000	str
Alkynes	$\text{C-H}$ (usually sharp)	3300	str
	$\text{C}\equiv\text{C}$ (symmetry reduces intensity)	2100–2250	var
Arenes	$\text{C-H}$ (may be several bands)	3030	var
	$\text{C}=\text{C}$ (in ring) (2 bands)	1600 and 1500	med-wk
	(3 if conjugated)		
Alcohols and Phenols	O-H (free), usually sharp	3580–3650	var
	O-H (H-bonded), usually broad	3200–3550	str
	C-O	970–1250	str
Alcohols and Phenols	O-H (free), usually sharp	3580–3650	var
	O-H (H-bonded), usually broad	3200–3550	str
	C-O	970–1250	str
Amines	N-H (2 bands)	3400–3500	wk
	N-H	3300–3400	wk
	C-N	1000–1250	med
Aldehydes and Ketones	$\text{C-H}$ (aldehyde $\text{C-H}$ )	2690–2840	med
	$\text{C}=\text{O}$ (saturated aldehyde)	1720–1740	str
	$\text{C}=\text{O}$ (saturated ketone)	1710–1720	str
	aryl ketone	1690	str
	$\alpha$ , $\beta$ -unsaturation	1875	str
	cyclopentanone	1745	str
	cyclobutanone	1780	str

ตารางที่ 6.4 ความถี่ของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันบางชนิด (ต่อ)

Type of vibration		ช่วงคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	Intensity
Carboxylic Acids and Derivatives	O-H (very broad)	2500–3300 (acids) overlap C-H	str
	C=O (H-bonded)	1705–1720 (acids)	str
	O-C (sometimes 2-peaks)	1210–1320 (acids)	med-str
	C=O	1785–1815 (acyl halides)	str
	C=O (2-bands)	1750 and 1820 (anhydrides)	str
Carboxylic Acids and Derivatives	O-C	1040–1110	str
	C=O	1735–1750	str
	O-C (2-bands)	1000–1300	str
Carboxylic Acids and Derivatives	C=O (amide I band)	1630–1695 (amides)	str
Nitriles Isocyanates, Isothiocyanates, Diimides, Azides and Ketenes	$\text{C}\equiv\text{N}$ (sharp)	2240–2280	med
	-N=C=O, -N=C=S -N=C=N-, $-\text{N}_3$ , C=C=O	2100–2270	med

หมายเหตุ : str : strength

med : medium

wk : weak

var : variance

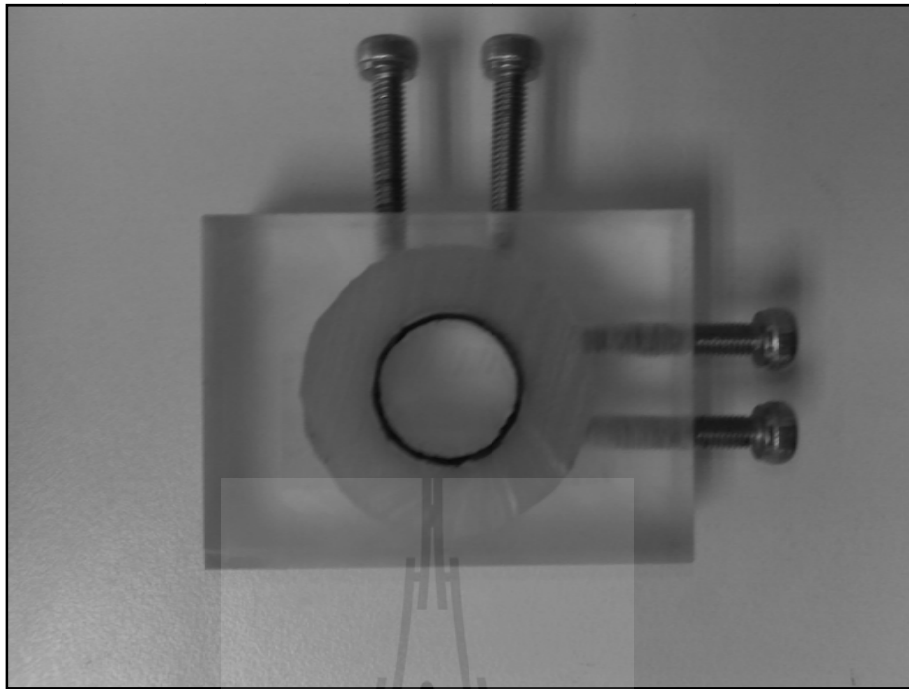
#### 6.4.2 การตัดฉนวน XLPE สำหรับตรวจสอบโครงสร้างทางเคมี

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE จากสายเคเบิล 22 kV ด้วยวิธี FTIR จำเป็นต้องทำการตัดฉนวนสายเคเบิลให้แสงอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านได้ โดยนำสายเคเบิลที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้า มาทำการตัดด้วยเครื่องตัดเนื้อเยื่อ (ไมโครโทม) ในตำแหน่งที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้าให้มีขนาด  $60\text{ }\mu\text{m}$  โดยการตัดสายเคเบิลด้วยเครื่องไมโครโทมต้องสร้างตัวยึดจับชิ้นงานสาย

เคเบิลโดยเฉพาะเพื่อให้่ายในการตัดและมีความถูกต้องของขนาดมากที่สุด เครื่องตัดเนื้อเยื่อไมโครโทม ตัวยึดจับชิ้นงานสายเคเบิลและชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องไมโครโทมแสดงในรูปที่ 6.49 รูปที่ 6.50 และรูปที่ 6.51 ตามลำดับ ชิ้นงานที่ตัดอย่างสมบูรณ์จะเก็บใส่ในภาชนะมิดชิดและใส่ซิลิกาเจลแบบเม็ดเพื่อดูดความชื้น



รูปที่ 6.49 เครื่องตัดไมโครโทม



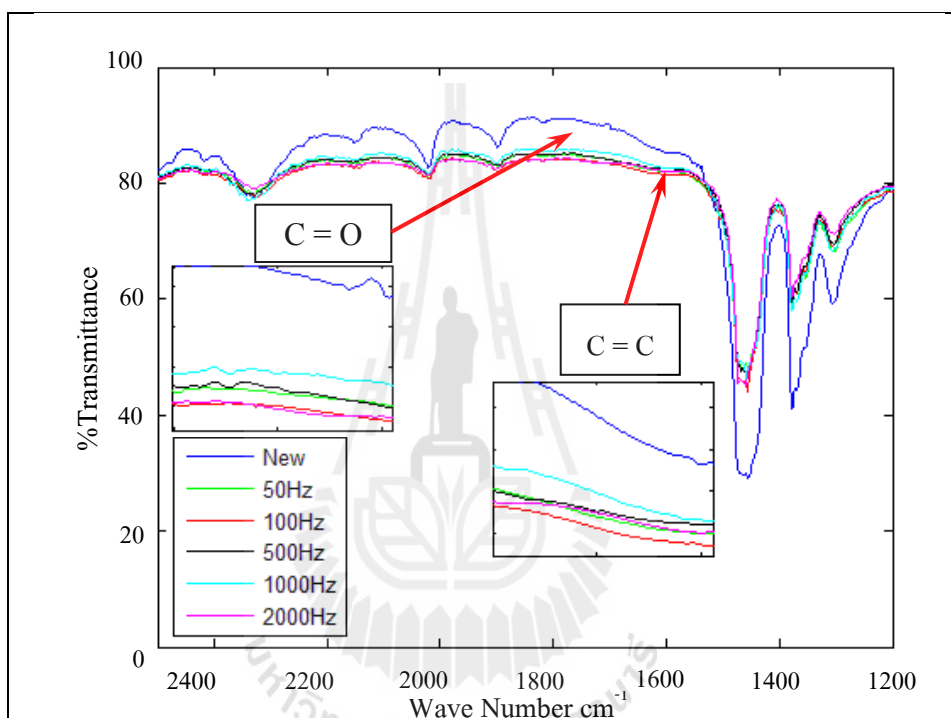
รูปที่ 6.50 ตัวยึดจับชิ้นงานสายเคเบิล



รูปที่ 6.51 ชิ้นงานที่ผ่านการตัดด้วยเครื่องตัดไมโครโทม

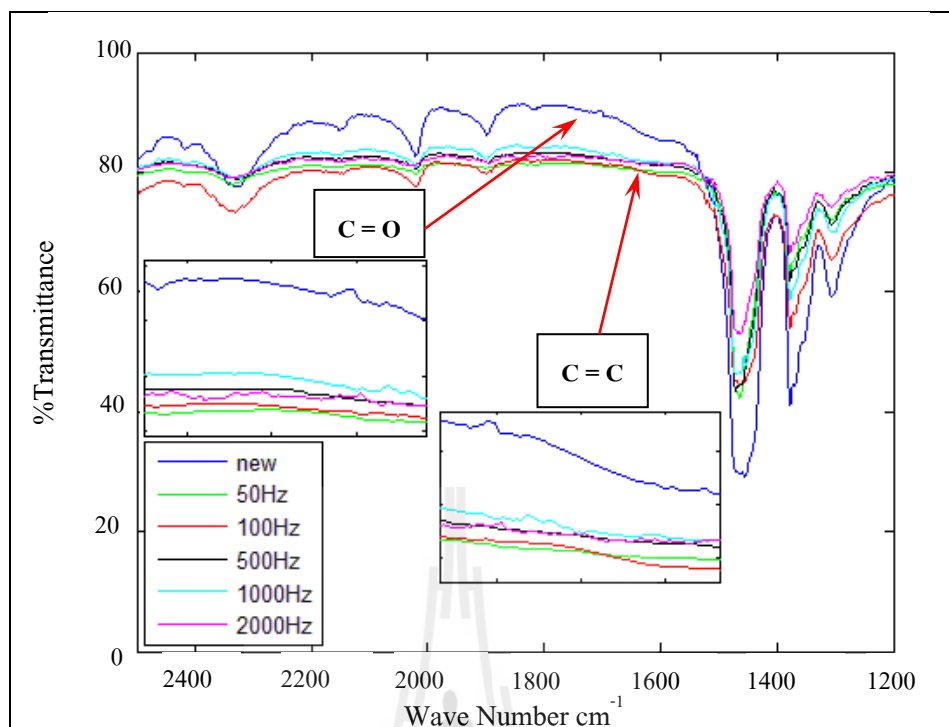
### 6.4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้า

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE จากสายเคเบิล 22 kV ที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจากการศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าที่แรงดัน 8 kV รูปคลื่นแรงดันไซน์และรูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยมอุณหภูมิ 25°C 60°C 75°C และ 90°C ความถี่แรงดัน 50Hz 100Hz 500Hz 1,000Hz และ 2,000Hz ตามลำดับ ด้วยเครื่อง FTIR ดังแสดงในรูปที่ 6.52 ถึงรูปที่ 6.59

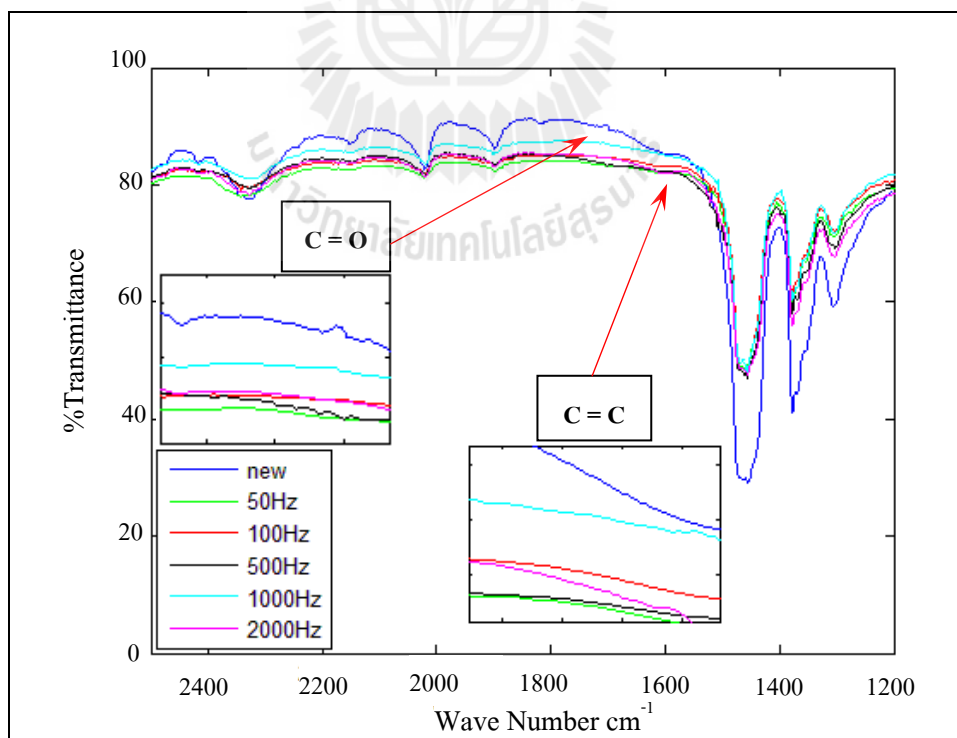


รูปที่ 6.52 FTIR spectrum ของฉนวน ที่อุณหภูมิ 25°C รูปคลื่นแรงดันไซน์

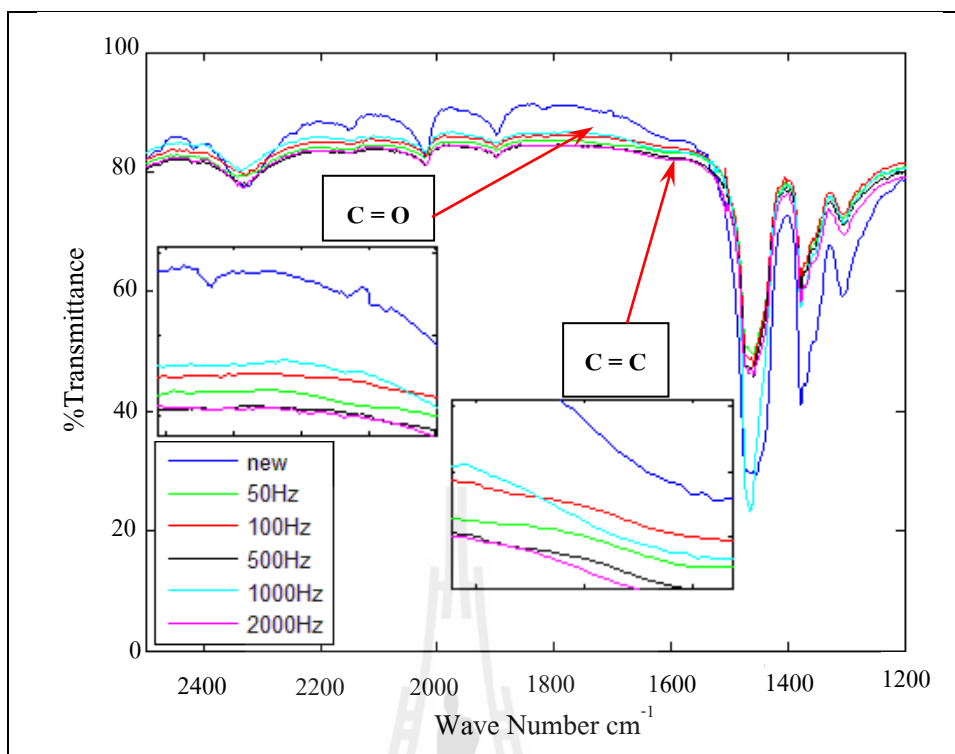




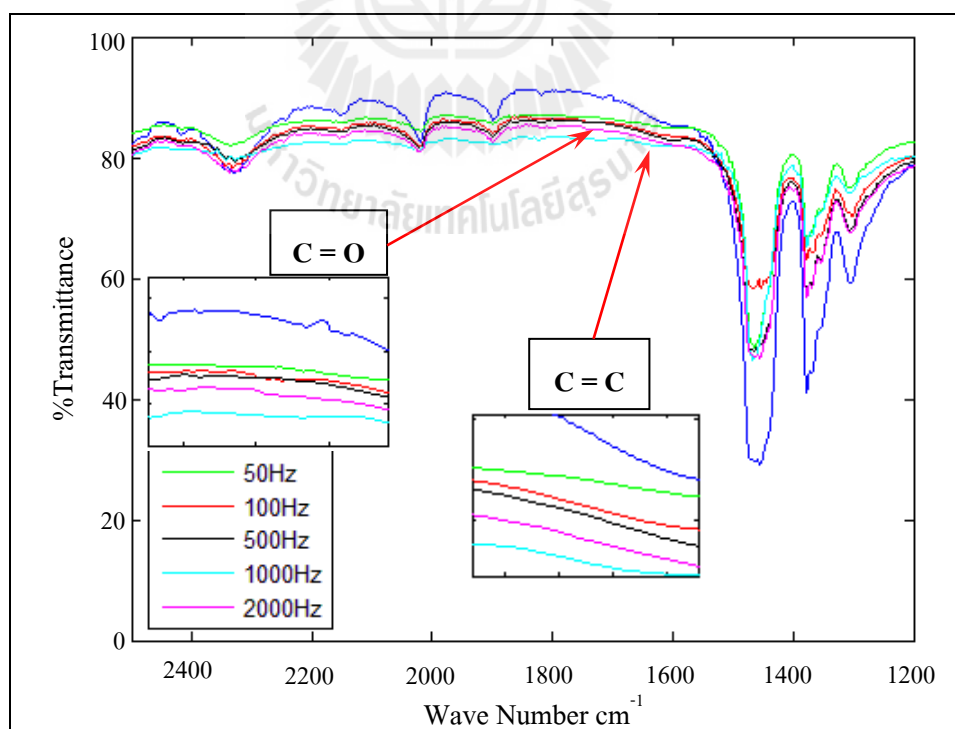
รูปที่ 6.53 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิ 60°C รูปคลื่นแรงดัน 50Hz



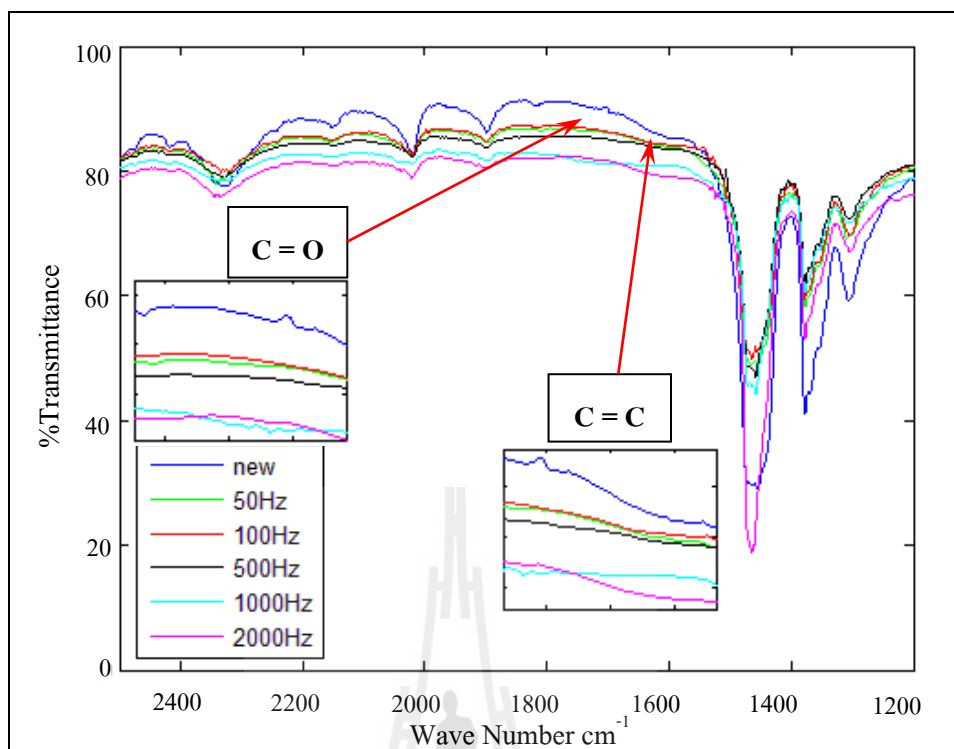
รูปที่ 6.54 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิ 75°C รูปคลื่นแรงดัน 50Hz



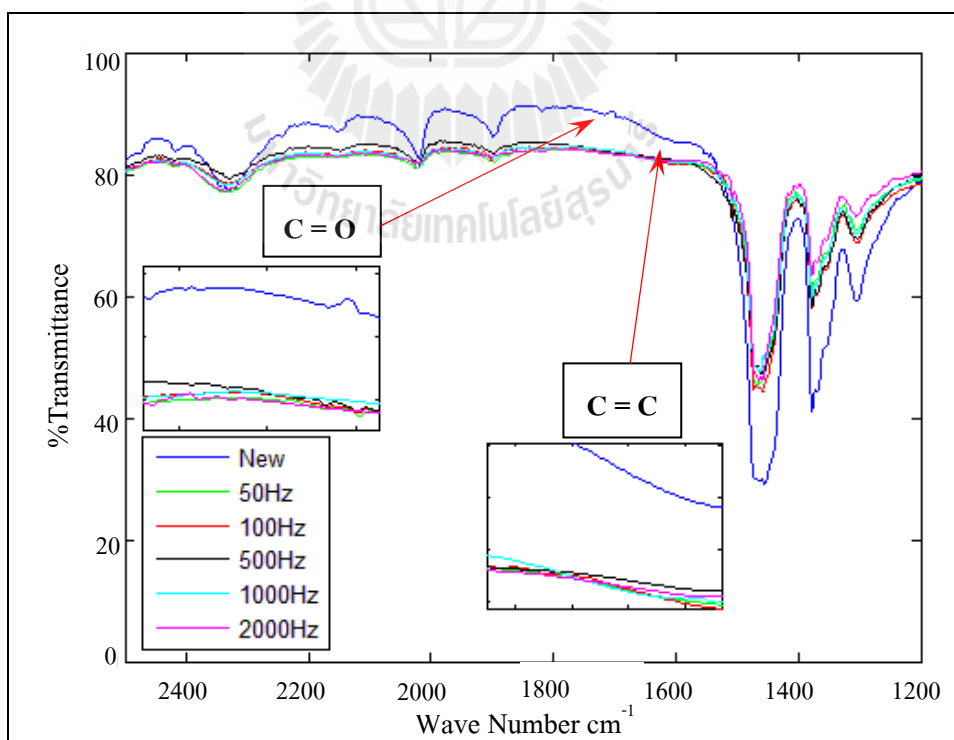
รูปที่ 6.55 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิ 90°C รูปคลื่นแรงดันไซน์



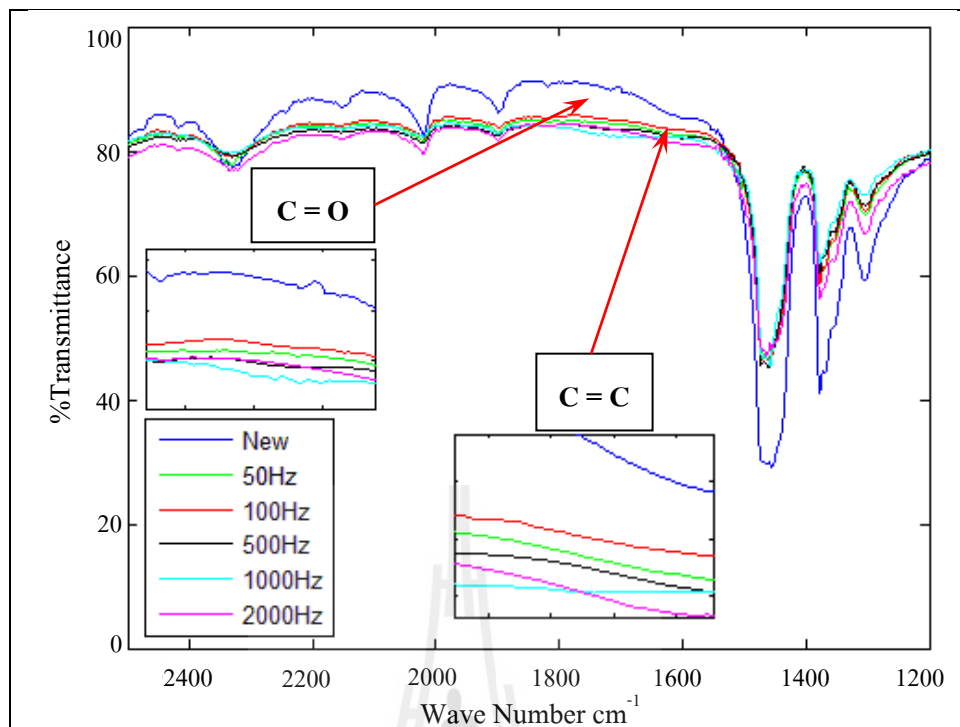
รูปที่ 6.56 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิ 25°C รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม



รูปที่ 6.57 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิ 60°C รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม

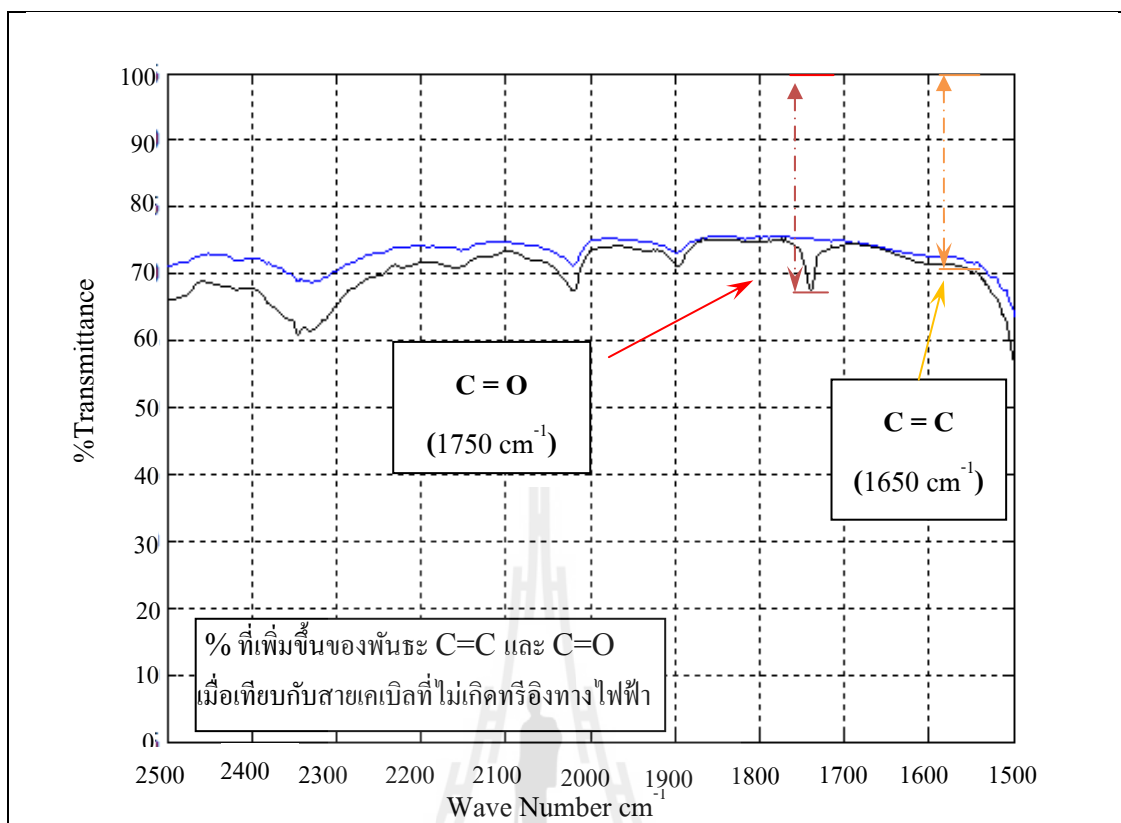


รูปที่ 6.58 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิ 75°C รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม



รูปที่ 6.59 FTIR spectrum ของฉนวน XLPE ที่อุณหภูมิ 90°C รูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยม

จากรูปการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการทดสอบทริอิงทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง FTIR เห็นได้ชัดว่าพันธะ C=C และ C=O อันเกิดจากการเผาไหม้และการเกิดออกซิเดชันของเนื้อฉนวนมีขนาดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบและขนาดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทดสอบซึ่งตรงกับความเป็นจริง ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบขนาดของพันธะ C=C และ C=O ที่เพิ่มขึ้นหลังจากการศึกษาวិจัยทริอิงทางไฟฟ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบระหว่างตำแหน่งที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้าและฉนวนสายเคเบิลใหม่ไว้ในตารางที่ 6.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวนแสดงดังรูปที่ 6.60



รูปที่ 6.60 พันธะของ C=C และ C=O ที่เพิ่มขึ้นหลังจากเกิดทรีอิงทางไฟฟ้า

ตารางที่ 6.5 อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของพันธะระหว่าง C=C และ C=O ในตำแหน่งที่เกิด  
ทรีอิงทางไฟฟ้าคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ กับสายเคเบิลใหม่

รูปคลื่นสัญญาณ	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	ความถี่ของ แรงดัน (Hz)	อัตราส่วนที่ เพิ่มขึ้นของ C=C	อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ของ C=O
Sine wave	25	50	38.71%	62.12%
		100	41.93%	73.91%
		500	35.48%	65.21%
		1,000	29.03%	56.52%
		2,000	35.48%	73.91%
Sine wave	60	50	47.32%	81.43%
		100	46.12%	76.39%
		500	48.38%	73.10%
		1,000	45.16%	71.30%
		2,000	45.16%	75.54%

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของพันธะระหว่าง C=C และ C=O ในตำแหน่งที่เกิด  
 ทริอิงทางไฟฟ้าคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ กับสายเคเบิลใหม่ (ต่อ)

รูปคลื่นสัญญาณ	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	ความถี่ของ แรงดัน (Hz)	อัตราส่วนที่ เพิ่มขึ้นของ C=C	อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ของ C=O
Sine wave	75	50	49.56%	67.21%
		100	40.66%	65.21%
		500	47.98%	66.56%
		1,000	25.54%	45.32%
		2,000	45.23%	65.86%
Sine wave	90	50	29.03%	60.87%
		100	22.58%	52.17%
		500	35.48%	69.57 %
		1,000	25.80%	43.47%
		2,000	38.71%	73.91%
Triangle wave	25	50	16.12%	43.48%
		100	25.8%	52.17%
		500	25.8%	52.17%
		1,000	41.94%	82.6%
		2,000	35.48%	60.87%
Triangle wave	60	50	22.58%	47.83%
		100	19.35%	39.13%
		500	25.8%	56.52%
		1,000	54.84%	91.30%
		2,000	61.30%	98.00%
Triangle wave	75	50	38.70%	73.91%
		100	38.70%	69.56%
		500	38.70%	69.56%
		1,000	38.70%	69.56%
		2,000	38.70%	73.91%

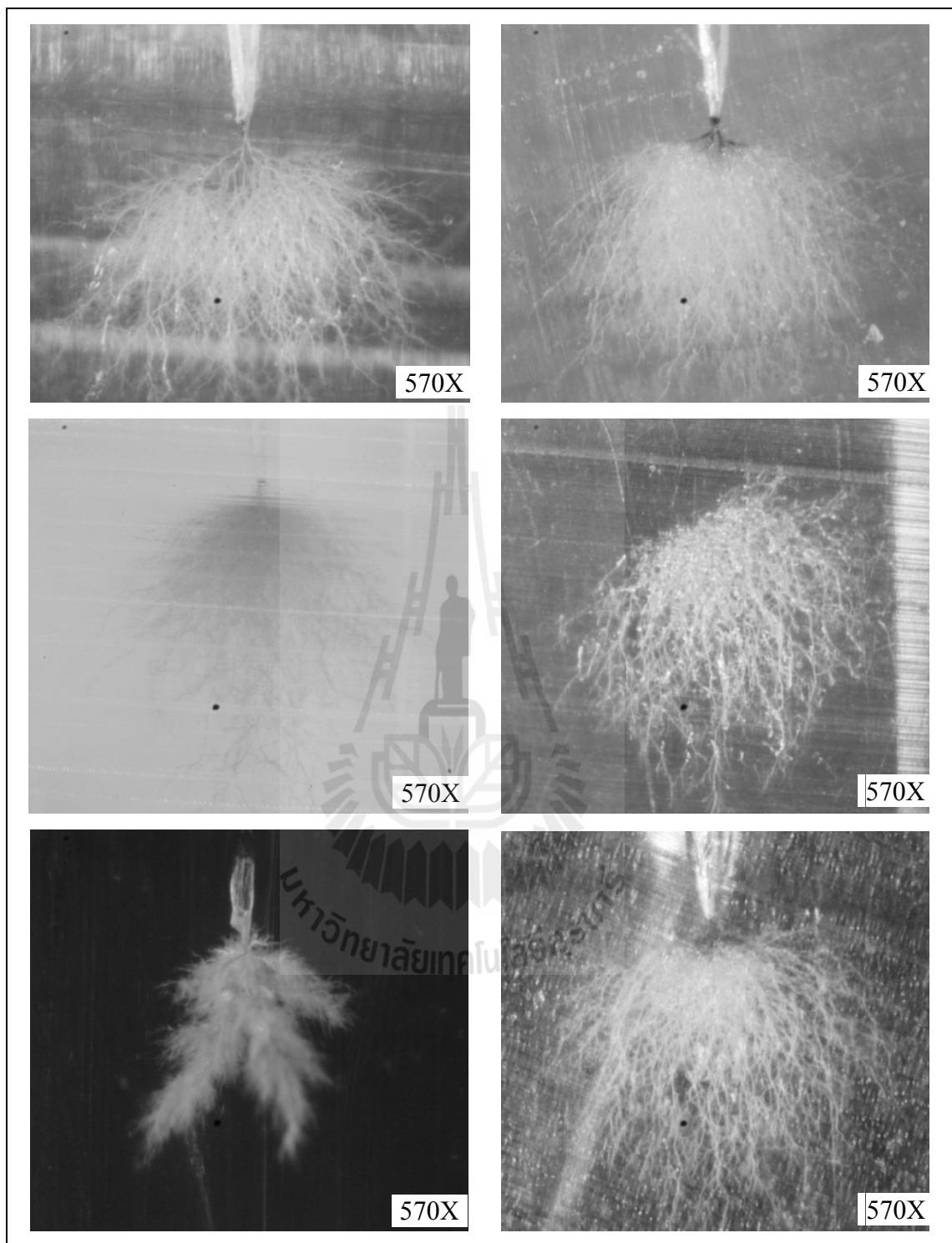
ตารางที่ 6.5 แสดงค่าอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของพันธะระหว่าง C=C และ C=O ในตำแหน่งที่เกิด  
 ทริอิงทางไฟฟ้าคิดเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ กับสายเคเบิลใหม่ (ต่อ)

รูปคลื่นสัญญาณ	อุณหภูมิทดสอบ (°C)	ความถี่ของ แรงดัน (Hz)	อัตราส่วนที่ เพิ่มขึ้นของ C=C	อัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ของ C=O
Triangle wave	90	50	35.48%	69.56%
		100	29.03%	56.52%
		500	35.48%	73.91%
		1,000	45.16%	86.95%
		2,000	45.16%	73.91%

การเพิ่มขึ้นของพันธะ C=C และ C=O ในสายเคเบิลฉนวน XLPE ในตำแหน่งที่  
 เกิดทริอิงทางไฟฟ้า เป็นเครื่องยืนยันถึงการเสื่อมอายุของฉนวนที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้าโดยจะขึ้นอยู่กับ  
 ความถี่ของแรงดันในการศึกษาวิจัย อุณหภูมิที่ใช้และสัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่ใช้ในการศึกษา  
 วิจัย

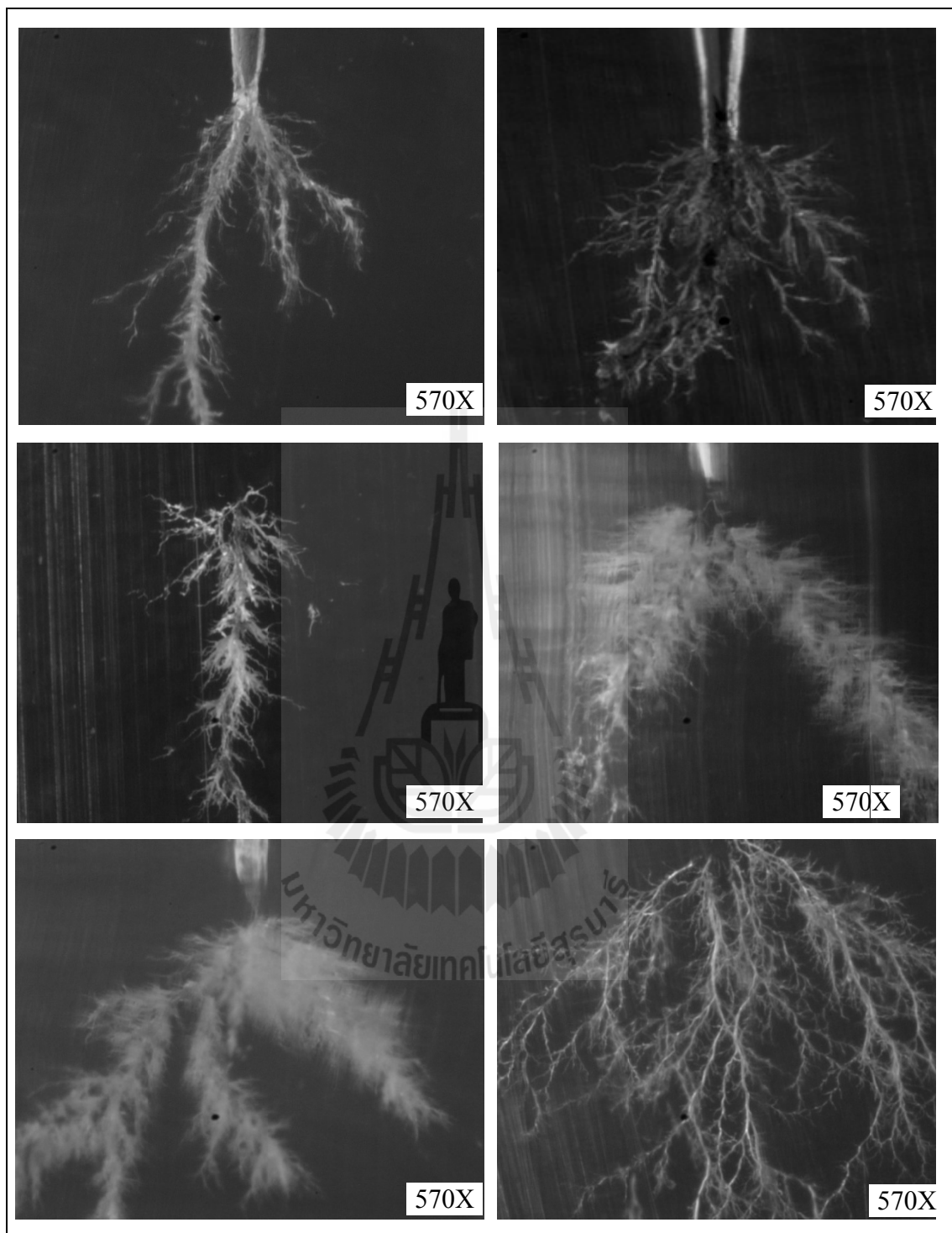
## 6.5 การตรวจสอบโครงสร้างกายภาพของฉนวน XLPE ภายหลังจากการศึกษาวิจัย ทริอิงทางไฟฟ้า

การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE เป็นการพิสูจน์และยืนยันถึง  
 การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้า การตรวจสอบ  
 โครงสร้างทางกายภาพของเนื้อฉนวน XLPE หลังการศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าจะใช้กล้อง  
 จุลทรรศน์ OLYMPUS รุ่น SZX9 ในการตรวจสอบลักษณะของทริอิงทางไฟฟ้าภายหลังจาก  
 การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบ่งได้ 2 รูปแบบคือ ทริอิงแบบพุ่มแสดงในรูปที่ 6.65 และทริอิง  
 แบบกิ่งแสดงในรูปที่ 6.66



รูปที่ 6.65 โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE เกิดทริอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่ม





รูปที่ 6.66 โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE เกิดทรีอิงทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง

## 6.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 6 ได้กล่าวถึงลักษณะรูปแบบของทร้องทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื่อฉนวน XLPE กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE เพื่อพิสูจน์และยืนยันความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยทร้องทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE ซึ่งสามารถอธิบายปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของทร้องทางไฟฟ้า โครงสร้างทางเคมีและโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ได้ดังนี้

ลักษณะของทร้องทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเนื่อฉนวน XLPE เมื่อให้แรงดันคงที่ อัตราการเกิดและขยายตัวของทร้องทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงดันไฟฟ้า โดยที่ความถี่ต่ำอัตราการเกิดและขยายตัวของทร้องทางไฟฟ้าก็จะต่ำ ลักษณะรูปแบบของทร้องที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบคล้ายกับพุ่มไม้ และเมื่อความถี่ของแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นอัตราขยายตัวของทร้องทางไฟฟ้าก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย และรูปแบบของทร้องจะมีลักษณะคล้ายกับการแตกกิ่งก้านของต้นไม้เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิขณะทำการทดสอบ พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการขยายตัวของทร้องทางไฟฟ้าก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาผลของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันพบว่า รูปคลื่นแรงดันไซน์ และรูปคลื่นแรงดันสามเหลี่ยมส่งผลต่อลักษณะและรูปแบบการเกิดของทร้องทางไฟฟ้าคือ รูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ต่ำ (50Hz 100Hz) ทร้องทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีการขยายตัวอย่างช้า ๆ มีลักษณะคล้ายพุ่มไม้ มีการแตกกิ่งก้านสาขาน้อย แตกต่างกับทร้องทางไฟฟ้าที่เกิดจากสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม จะเกิดขึ้นและขยายตัวอย่างรวดเร็ว มีการแตกกิ่งก้านสาขามาก หากไม่หยุดการจ่ายแรงดันอาจเกิดเบรกดาวน์ในเนื่อฉนวน และที่ความถี่สูง(500Hz 1000Hz และ 2000Hz) สัญญาณรูปคลื่นไซน์ ทร้องทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะการขยายตัวอย่างรวดเร็ว มีการแตกกิ่งก้านสาขามาก แต่ในทางกลับกันสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมทร้องทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะการขยายตัวอย่างช้า ๆ คล้ายพุ่มไม้

โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE จะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR โดยให้ผลวิเคราะห์ออกมาเป็นรูปแบบกราฟ และนำค่าจากกราฟมาทำการคำนวณการเพิ่มขึ้นของพันธะ C=C และ C=O แสดงในตารางที่ 6.5 ซึ่งเป็นการแสดงการเพิ่มขึ้นเป็นเปอร์เซ็นต์ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่เกิดทร้องทางไฟฟ้าในเนื่อฉนวน XLPE สามารถสรุปตามลักษณะและรูปแบบของทร้องทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเนื่อฉนวน XLPE ได้ว่าทร้องทางไฟฟ้าแบบคล้ายพุ่มมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C=C และ C=O มากกว่าทร้องทางไฟฟ้าแบบคล้ายกิ่ง อย่างไรก็ตามผลการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวนอาจคลาดเคลื่อนเนื่องจากการนำสายเคเบิลไปทำการตรวจสอบต้องตัดให้มีขนาด 60  $\mu\text{m}$  ซึ่งจะทำให้แสงอินฟราเรดทะลุผ่านได้ง่าย การตัดสายเคเบิลที่เกิดทร้องทางไฟฟ้าขึ้นจะทำให้ทร้องทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นถูกตัดแบ่งออกเป็นหลาย

ส่วนเนื่องจากการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจะเกิดขึ้นในรูปแบบสามมิติ เมื่อถูกตัดแบ่งเป็นหลายส่วนแล้วนำไปทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค FTIR อาจทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง

โครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ทำการวิเคราะห์ผลด้วยกล้องจุลทรรศน์ ใช้ทำการตรวจสอบพื้นผิวทางกายภาพของเนื้อฉนวน XLPE ในบริเวณที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้า พบว่าในตำแหน่งที่เกิดทริอิงทางไฟฟ้าในเนื้อฉนวนจะมีลักษณะเป็นช่องว่างขนาดเล็ก พบรอยไหม้สีดำรอบ ๆ ช่องว่างนั้น ซึ่งเกิดจากการดีสชาร์จบางส่วนเป็นเวลานานติดต่อกันเป็นสาเหตุให้โครงสร้างทางกายภาพของฉนวนถูกทำลายลง และทำให้ฉนวนหมดคุณสมบัติในการเป็นฉนวน



## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการศึกษาทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลแรงสูงฉนวน XLPE สำหรับระบบจำหน่าย 22 kV ด้วยการศึกษาวิจัยภายใต้สภาวะความเครียดทางแรงดัน ความเครียดทางความร้อน เพื่อจะทราบถึงปัจจัยการเกิด การขยายตัว และลักษณะรูปแบบของทริอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE พร้อมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ สเตอริโอ และวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยวิธี FTIR เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุง ฉนวนพอลิเมอร์ที่นำมาทำเป็นสายเคเบิล ให้มีความคงทนต่อปรากฏการณ์ทริอิงทางไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้น และเสี่ยงต่อความสูญเสียในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวนี้ได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ได้นำเสนอความสำคัญและที่มาของปัญหา โดยกล่าวถึงความสำคัญของการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวนสายเคเบิล ซึ่งเป็นการเสื่อมอายุในสายเคเบิลระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อระบบฉนวนของสายเคเบิลฉนวน XLPE เนื่องจากในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ทริอิงทั้งแบบทริอิงทางไฟฟ้าและแบบทริอิงจากน้ำก้นอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงสาเหตุของการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว เพื่อหาวิธีในการป้องกันหรือแก้ไข หลีกเลี่ยงความผิดพลาดต่าง ๆ ที่จะตามมาในภายหลังซึ่งอาจจะส่งผลร้ายแรงต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าและอาจจะส่งผลไปยังความเชื่อมั่นของระบบต่าง ๆ ภายในประเทศอีกด้วย ซึ่งงานวิจัยต่าง ๆ เกี่ยวกับปรากฏการณ์ทริอิงได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอทฤษฎีและสมมติฐานที่เกี่ยวข้องกับสายเคเบิลไฟฟ้า คุณสมบัติของตัวนำ และคุณสมบัติของฉนวน XLPE โดยกล่าวถึงวิวัฒนาการของสายเคเบิลตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โครงสร้างส่วนสำคัญต่าง ๆ ของสายเคเบิล และอธิบายข้อดีและข้อเสียของฉนวนต่าง ๆ ที่ใช้ในสายเคเบิล คุณสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดต่าง ๆ ที่นำมาทำเป็นฉนวน รวมไปถึงการเสื่อมอายุของสายเคเบิลในกรณีต่าง ๆ เช่น การเสื่อมอายุจากปรากฏการณ์ทริอิงจากน้ำ ปรากฏการณ์ทริอิงทางไฟฟ้า เพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างของสายเคเบิลอย่างละเอียด การใช้งานอย่างถูกวิธี

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบชุดศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE การสร้างชุดศึกษาวิจัยตามที่ออกแบบไว้โดยอธิบายถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ของชุดศึกษาวิจัยอย่างละเอียด การเตรียมวัสดุในการวิจัยได้แก่ สายเคเบิลฉนวน XLPE การตัดสายเคเบิล การอบสายเคเบิลเพื่อไล่ความชื้นที่เกิดขึ้นจากการตัดสายเคเบิล การเตรียมการวิจัย การจัดเก็บตัวอย่างสายเคเบิลที่จะนำมาวิจัย และการศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE จะใช้การจำลองสภาวะพหุความเครียด คือ ความเครียดทางไฟฟ้า และความเครียดทางความร้อน เพื่อศึกษาวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าและเปรียบเทียบลักษณะรูปแบบของทริอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการจำลองสภาวะต่าง ๆ ในการวิจัยจะใช้พิกัดแรงดัน 8 kV คงที่ตลอดการวิจัย ใช้รูปคลื่นสัญญาณไซน์และรูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยมในการวิจัย ใช้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 50 Hz 100 Hz 500 Hz 1000 Hz และ 2000 Hz ตามลำดับ ใช้อุณหภูมิ 25°C 60°C 75°C และ 90°C ตามลำดับ จากนั้นจึงนำผลการศึกษาและวิจัยไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5 เป็นการนำเสนอผลการศึกษาและวิจัยทริอิงทางไฟฟ้าในสายเคเบิลฉนวน XLPE ตามสภาวะที่ทำการจำลองความเครียดต่าง ๆ เพื่อศึกษาลักษณะรูปแบบของทริอิงทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE สามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดได้ 2 แบบคือ ทริอิงทางไฟฟ้าแบบพุ่มและทริอิงทางไฟฟ้าแบบกิ่ง โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ ศึกษาผลของความถี่แรงดันที่มีผลต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้า ศึกษาผลของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่มีผลต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้า

1) ศึกษาผลของความถี่แรงดันที่มีผลต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้า การขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงดันที่ใช้ โดยที่ความถี่สูงขึ้นอัตราการเกิดและขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย

2) ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้า การขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ โดยที่อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดและขยายตัวของทริอิงทางไฟฟ้าจะสูงขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม แม้ว่าความร้อนส่งผลให้ทริอิงทางไฟฟ้ามีการเกิดและขยายตัวเร็วขึ้นแต่ในช่วงความถี่ของแรงดันไฟฟ้าต่ำ (50Hz 100Hz) ความร้อนก็ยังไม่สามารถทำให้ทริอิงทางไฟฟ้าขยายตัวออกไปจนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนสายเคเบิล XLPE ได้ เพียงแต่ทำให้กิ่งของทริอิงทางไฟฟ้ามีขนาดใหญ่ขึ้นและเมื่อคู่ด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอพบว่า สีของทริอิงทางไฟฟ้านั้นเข้มมากขึ้น

3) ศึกษาผลของสัญญาณรูปคลื่นแรงดันที่มีผลต่อการเกิดทริอิงทางไฟฟ้าลักษณะของทริอิงทางไฟฟ้าที่ได้จากการใช้สัญญาณไซน์และสามเหลี่ยมมีความแตกต่างกันคือ รูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่ต่ำ (50Hz 100Hz) เกิดทริอิงทางไฟฟ้าแบบพุ่มแตกต่างกับทริอิงทางไฟฟ้าที่เกิดจาก

สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมเกิดทริ่งทางไฟฟ้าแบบกึ่ง และสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่สูง (500Hz 1000Hz และ 2000Hz) ทริ่งที่เกิดขึ้นคือ ทริ่งทางไฟฟ้าแบบกึ่ง แต่ในทางกลับกัน สัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมทริ่งทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะการขยายตัวอย่างช้า ๆ (ทริ่งแบบพุ่ม) อย่างไรก็ตาม เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิสูงขึ้น ( $60^{\circ}\text{C}$   $75^{\circ}\text{C}$  และ  $90^{\circ}\text{C}$ ) ปัจจัยจากอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเกิดและการขยายตัวของทริ่งทางไฟฟ้าโดยทริ่งที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นทริ่งแบบกึ่งคือ มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว และอาจเกิดเบรกควานได้

การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE เป็นการพิสูจน์และยืนยันถึงการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE ที่เกิดทริ่งทางไฟฟ้า การตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของฉนวน XLPE หลังการศึกษาวิจัยทริ่งทางไฟฟ้าจะใช้กล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS รุ่น SZX9 ในการตรวจสอบโครงสร้างของทริ่งทางไฟฟ้าแบบพุ่มจะมีการเกิดกระจุกตัวอยู่บริเวณปลายอิเล็กโทรด สีของทริ่งที่เกิดขึ้นจะเข้มบริเวณปลายอิเล็กโทรดและสีจะอ่อนลงเมื่อมีระยะห่างจากปลายอิเล็กโทรดมากขึ้นเรื่อย ๆ โครงสร้างทางไฟฟ้าแบบกึ่งจะมีการเกิดและกระจายตัวมากกว่าทริ่งทางไฟฟ้าแบบพุ่ม ขนาดของทริ่งแบบกึ่งมีขนาดใหญ่กว่าทริ่งแบบพุ่ม

การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวน XLPE ที่ผ่านการทดสอบทริ่งทางไฟฟ้า ปรากฏพันธะ C=C และพันธะ C=O ขึ้น อันเนื่องมาจากการเผาไหม้ และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของฉนวน XLPE การเกิดทริ่งทางไฟฟ้าในฉนวนเคเบิล XLPE และการเกิด การเผาไหม้ในฉนวน XLPE ซึ่งปริมาณการเกิดกระบวนการทั้งสองนี้สามารถบ่งชี้การเสื่อมอายุของฉนวน XLPE ได้ ลักษณะและรูปแบบของทริ่งทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฉนวน XLPE ทริ่งทางไฟฟ้าแบบพุ่มมีเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของพันธะ C=C และ C=O มากกว่าทริ่งทางไฟฟ้าแบบกึ่ง อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากรูปแบบและการกระจายตัวของทริ่งทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในฉนวนมีความแตกต่างกันเช่น ทริ่งทางไฟฟ้าแบบพุ่มมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมออยู่ในบริเวณเดียวกัน แต่ทริ่งทางไฟฟ้าแบบกึ่งมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ดังนั้น เมื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีเพื่อเปรียบเทียบผลการเสื่อมอายุของทริ่งทั้งสองแบบผลที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนออกไปจากความเป็นจริง เมื่อเทียบกับผลการตรวจสอบโครงสร้างทางกายภาพของทริ่งทางไฟฟ้าทั้งสองแบบ พบว่าทริ่งทางไฟฟ้าแบบกึ่งมีร่องรอยการเผาไหม้ที่รุนแรงชัดเจนจนทำให้ฉนวนเกิดเป็นช่องว่างขนาดใหญ่กระจายตัวออกไปมากเมื่อเปรียบเทียบกับทริ่งทางไฟฟ้าแบบพุ่มที่มองเห็นรอยไหม้ของฉนวนไม่ชัดเจน เห็นแต่เพียงรอยช่องว่างขนาดเล็กและกระจุกตัวกันอยู่เท่านั้น

บทที่ 6 เป็นการนำเสนอการจำลองสนามไฟฟ้าในการศึกษาวิจัยทริ่งทางไฟฟ้าด้วย PDE Toolbox ใน MATLAB เพื่ออธิบายการเริ่มเกิดและการขยายตัวของทริ่งทางไฟฟ้า และยังเป็น

การตรวจสอบความถูกต้องเหมาะสมของการกำหนดระยะห่างของอิเล็กโทรดปลายแหลมกับ ระบาย และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฉนวน XLPE ในการศึกษาวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้า สนามไฟฟ้า สูงสุดในการศึกษาวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้าควรอยู่ระหว่าง สนามไฟฟ้าสูงสุดของสายเคเบิลในการใช้ งานจริงกับ ค่าคงทนไดอิเล็กตริกของฉนวน XLPE ( $E_{\max} < E_{in} < E_c$ )

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา มีข้อเสนอแนะในการดำเนินวิจัยวิทยานิพนธ์ดังนี้

1. ควรทำการทดสอบในห้องที่ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิภายนอก เช่น ห้องปรับอากาศ เพื่อการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการศึกษาวิจัย
2. เมื่อทำการตัดและอบสายเคเบิลฉนวนแล้ว ควรเก็บในกล่องสุญญากาศ และใส่ ซิลิกาเจลเพื่อดูดความชื้นออกจากฉนวน เพื่อป้องกันความชื้นและทำให้ผลการศึกษาวิจัย คลาดเคลื่อนได้

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาและผลที่ได้ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะ ในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

- 1) ความหนาของฉนวนมีผลต่อตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีอย่างมาก ควรตัดชิ้นงานด้วย เครื่องตัดที่มีความแม่นยำของขนาดสูงและทำการวัดขนาดความหนาของชิ้นงาน จะทำให้ผลที่ได้ ใกล้เคียงกับค่าความเป็นจริงมากที่สุด
- 2) ในการตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีของฉนวนด้วยเครื่อง FTIR ควรทำการระบุตำแหน่ง ที่ตรวจสอบให้มีความแน่นอนและครอบคลุมทั้งบริเวณที่เกิดทรีอิงทางไฟฟ้าในชิ้นงานนั้น ๆ และ ทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้มีความถูกต้องเที่ยงตรงมากที่สุด
- 3) จำลองการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้าในฉนวน XLPE เพื่อเปรียบเทียบการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้า ในการศึกษาวิจัยทรีอิงทางไฟฟ้า เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของลักษณะรูปแบบการเกิดของ ทรีอิงทางไฟฟ้า

## รายการอ้างอิง

- ตำรวจ สังกัดสอ. (2547). **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (ฉบับปรับปรุง)**.  
สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม **Thai Industrial Standard ICS**  
29.060.20 มอก. 2202 2547
- อรรถพล ตะเร. (2551). **คุณสมบัติและการทดสอบวัสดุ**
- Andrew, J., and Peacock, (2000). **Handbook of polymer**
- AL-Hamouz, "Electrical Diagnostic Techniques to Assess Water Trees in Extruded Underground  
Power Cables", **8<sup>th</sup> Annual IEEE Technical Exchange Meeting**.
- Boggs, S., and Mashikian, M.S. (2002). Role of Semiconducting Compounds in Water Treeing of  
XLPE Cable Insulation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 6(20): 1-5.
- Boggs, S., and Xu, J., (2001). Water treeing-Filled versus Unfilled Cable Insulation. **IEEE  
Electrical Insulation Magazine**. 17(1): 23-29.
- Chan, J.C., and Cometa, E.T. (1992). Electrical aging performance of tree retardant XLPE versus  
standard XLPE as insulation for distribution cables. **IEEE Trans. on Power Delivery**.  
7(2): 642–648.
- Gulmine, J.V., and Akcelrud, L. (2006). **FTIR characterization of aged XLPE**. Polymer testing  
25: 932-942.
- Jailani, M.F.B.M. (2010). **Degradation of polymeric power cable due to water tree under AC  
voltage**. Thesis University Technology Malaysia.
- Kim, D.H., and Park, E.J. (1998). An investigation of influence of semiconductive electrode  
materials in breakdown and charge accumulation in XLPE. In **Proceeding of IEEE  
Conference Electrical Insulation Dielectrics and Phenomena** (pp.546–549).
- Miyashita, T. (1969). Deterioration of water-immersed polyethylene coated wire by treeing. In  
**Proceeding of IEEE-NEMS Electrical Insulation Conference** (pp. 131–135).
- Moore, G.F. (1997). **Electric Cables Handbook**, 3<sup>rd</sup> edition.
- Orton, H., and Hartlein, R. (2006). Long Life XLPE Insulated Power Cables. **7<sup>th</sup> International  
Conference on Insulated Power Cables**.



- Suenaga, K., Uchida, K. and Hozumi, N. (2008). Location of Water Tree Degraded Point Along XLPE Cable Line Using DC Voltage. **International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China.**
- Tawashima, T. and Maki, T. (1991). Study on water treeing retardant XLPE insulations. In **Proceeding of of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Properties Application Dielectric Materials.** (pp. 222–225). Tokyo, Japan
- Uchida, K., Kato, Y., Nakade, M., Inoue, D., Sakakibara, H. and Tanaka, H. (2001). Estimating the Remaining Life of Water-Treed XLPE Cable by VLF Voltage Withstand Tests. **Furukawa Review**, (20): 65-70.
- Vahedy, V. (2006). Polymer insulated high voltage cables. **IEEE Electrical Insulation Magazine.** 22(3): 13 – 18.
- Xie, A., Zheng, X., Li, S. and Chen G. (2010). Investigations of Electrical Trees in the Inner Layer of XLPE Cable Insulation Using Computer-aided Image Recording Monitoring. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.** 17(3): 685-693.
- Yang, J.J. and Birlasekaran, S. (2005). Characteristic Features of Electrical Treeing in XLPE and PE. **Power Engineering Conference. IPEC 2005. The 7th International.** (pp. 1-34)
- Zheng, X. and Chen, G. (2011). Propagation mechanism of electrical tree in XLPE cable insulation by investigating a double electrical tree structure. **IEEE Transactions On Dielectri and Electrical Insulation.** 15: 800 – 807.

ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Thiamsri, R., Ruangajonmathee, N., Marungsri, B., and Oonsivilai, A. (2011) **Effect of Applied Voltage Frequency on Electrical Treeing in 22 kV Cross-link Polyethylene Insulated Cable**. Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol.60, pp. 376-381.

Ruangajonmathee, N., Thiamsri, R., and Marungsri, B., (2012) **Space Charge Distribution in 22 kV XLPE Insulated Cable by using Pulse Electroacoustic Measurement Technique**. Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology. Vol.72, pp. 1138-1141.



# Effect of Applied Voltage Frequency on Electrical Treeing in 22 kV Cross-linked Polyethylene Insulated Cable

R. Thiamsri, N. Ruangakajonmathee, A. Oonsivilai and B. Marungsri

**Abstract**—This paper presents the experimental results on effect of applied voltage stress frequency to the occurrence of electrical treeing in 22 kV cross linked polyethylene (XLPE) insulated cable. Hollow disk of XLPE insulating material with thickness 5 mm taken from unused high voltage cable was used as the specimen in this study. Stainless steel needle was inserted gradually into the specimen to give a tip to earth plane electrode separation of  $2.5 \pm 0.2$  mm at elevated temperature  $105-110^\circ\text{C}$ . The specimen was then annealed for 5 minute to minimize any mechanical stress build up around the needle-plane region before it was cooled down to room temperature. Each specimen were subjected to the same applied voltage stress level at 8 kV AC rms, with various frequency, 50, 100, 500, 1000 and 2000 Hz. Initiation time, propagation speed and pattern of electrical treeing were examined in order to study the effect of applied voltage stress frequency. By the experimental results, initial time of visible treeing decreases with increasing in applied voltage frequency. Also, obviously, propagation speed of electrical treeing increases with increasing in applied voltage frequency. Furthermore, two types of electrical treeing, bush-like and branch-like treeing were observed. The experimental results confirmed the effect of voltage stress frequency as well.

**Keywords**—Voltage stress frequency, cross-linked polyethylene, electrical treeing, treeing propagation, treeing pattern

## I. INTRODUCTION

RECENTLY, cross linked polyethylene (XLPE) material is widely used as insulating material in high voltage cable for electrical transmission and distribution systems because of its excellent physical, chemical and dielectric properties. However, under multi-stress, i.e. electrical, thermal and mechanical stresses, and over a period of time, its chemical composition and physical morphology may change without avoidable. In consequence, its properties may alter, i.e. increasing of conductivity and dielectric loss and reduction of mechanical, electrical and thermal strengths. Finally, ageing deterioration of XLPE material may occur. Many phenomena can induce ageing of XLPE material. Partial discharge is one of those phenomena. Electrical treeing is one of partial discharge in an insulation system of XLPE insulated cable. Electrical treeing is not only the main factor affecting the

reliability of cable insulation, but also the final destructive form of cable insulation operating in the long run. Electrical trees can be initiated from various defects in cable insulation, such as impurity or local high electric field due to the protuberance of semi-conducting shielded layer. It is found that the factors responsible for initiating and propagating of electrical trees in cable insulation depend upon not only the cable manufacturing technique, physical morphology of insulation material but also depending on the frequency of applying voltage [1-5].

Rawangpai et al. [6] reported the experimental results on artificial ageing test of 22 kV XLPE cable for distribution system application in Thailand. XLPE insulating material of 22 kV cable was sliced to  $60-70 \mu\text{m}$  in thick and was subjected to ac high voltage at  $23^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  and  $75^\circ\text{C}$ . Testing voltage was constantly applied to the specimen until breakdown. Breakdown voltage and time to breakdown were used to evaluate life time of insulating material. The physical model by J.P. Crine for predicts life time of XLPE insulation material was adopted as life time model and was calculated in order to compare the experimental results.

Hozumi et al. [7] studied influence of morphology on electrical tree initiation in polyethylene and insulation of the XLPE cables under ac and impulse voltages.

Zheng et al. [8] studied the electrical tree growing characteristics. The relationship between electrical tree propagation and the material morphology in XLPE cable insulation has been elucidated.

Xie et al. [9] found the statistical initiation and propagation characteristics of electrical trees in XLPE cables with different voltage ratings from 66 to 500 kV. They investigated electrical treeing under a constant test voltage of 50 Hz/7 kV (the 66 kV rating cable is from UK, the others from China). They found that the characteristics of electrical trees in the inner region of 66 kV cable insulation differed considerably from those in the outer region under the same test conditions.

Yoshimura et al. [10] reported results on the influence of interfacial pressure on treeing deterioration in XLPE. However, they did not find any clear change in the breakdown time with increasing interfacial pressure.

Auckland et al. [11] focus on a mechanical approach to the understanding of electrical treeing. In their view, treeing initiation is believed to arise from fatigue forces induced by the applied voltage. During the growth microscopic explosions within the dielectric due to localized intrinsic breakdown will create shock waves which lead to fatigue failure and fracture. It is verified by experiments that tree growth may be

R. Thiamsri and N. Ruangakajonmathee are master degree student with Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000, Thailand.

A. Oonsivilai is with Center of Excellence in Electric Energy, Smart Materials, and Health Science, Postharvest Technology Research Center, School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand.

\*B. Marungsri is with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand (corresponding author, phone: +66 44224366; fax: +66 4422 4601; e-mail: bmarunsee@ sut.ac.th).

controlled by the fracture toughness of the polymer as well as by its modulus of elasticity.

Noto and Yoshimura [12] examined polyethylene under various frequencies of ac electric stress. It was found that tree does not follow a linear growth relationship with the frequency. Under various applied voltages, tree exhibits different growth characteristics with various frequencies.

Many researchers have studied the effects of morphology of semi-crystalline material on the initiation and propagation of electrical trees in the past decades, but little attention was paid to the influence of frequency voltage on electrical tree in XLPE cable insulation [7-12]. In this study, initiation time, propagation speed and pattern of electrical treeing in 22 kV XLPE insulated cable subjected to sinusoidal waveform voltage stress with various frequency from 50-2,000 Hz were examined. The effects of applied voltage stress frequency to the occurrence electrical treeing were studied and elucidated.

## II. TEST ARRANGEMENT

### A. Specimen

In this study, all specimens were taken from a commercial 22 kV XLPE distribution power cable having copper conductors 12 mm in diameter and XLPE insulation 6 mm thick, as shown in Fig. 1. This type of power cable is used for underground distribution system of Provincial Electricity Authority (PEA) of Thailand. Unused cable was cut into hollow disc with a thickness of 5 mm. Cable cover and semiconducting layer were removed before the experimental. Stainless steel needle was inserted gradually into the specimen to give a tip to earth-plane electrode separation of  $2.5 \pm 0.2$  mm at elevated temperature of  $105-110^\circ\text{C}$ . The specimen was then annealed for approximately 5 minutes to minimize any mechanical stress build up around the needle-plane region before it was cooled down to room temperature. A typical specimen with an inserted needle is shown in Fig. 2.

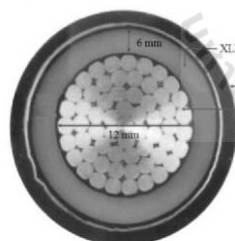


Fig. 1 Cross-section of 22 kV XLPE cable

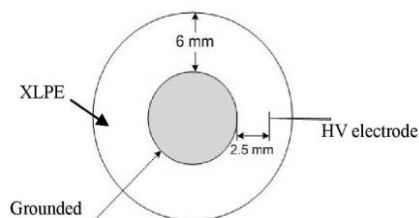


Fig. 2 Schematic diagram of specimen

### B. Test Method

During the experimental, the specimen was immersed in insulating bath oil to prevent external discharges or flashover. Test voltage was applied from high voltage amplifier (8 kV AC rms) with various frequencies at 50, 100, 500, 1000 and 2000 Hz, respectively. The experimental was conducted at room temperature ( $25^\circ\text{C}$ ). For each frequency of voltage stress, the occurrence of electrical treeing was enlarged by using digital microscope (5-500X) and was continuously recorded until electrical treeing cover  $\approx 90\%$  of needle-plane gap spacing. Electrical failure or breakdown of XLPE insulating material was avoided. Schematic diagram of experimental setup is illustrated in Fig. 3 and actual experimental layout is illustrated in Fig. 4.

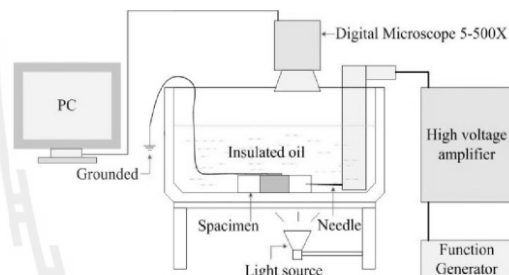


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

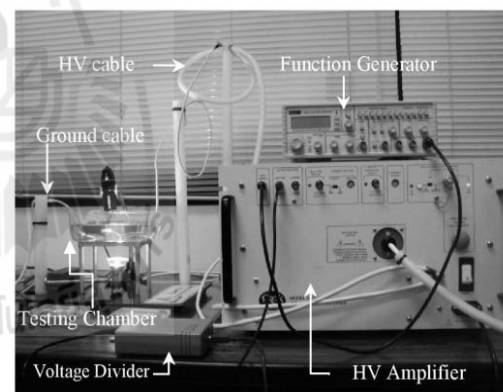


Fig. 4 Experimental Layout

## III. TEST RESULTS AND DISCUSSIONS

From the experimental results, significant differences in the occurrence of electrical treeing at each voltage stress frequency were observed. Three characteristics of electrical treeing, i.e. time of first visible treeing, treeing pattern and treeing propagation time, were analyzed and were discussed for each voltage stress frequency. Video capture software is useful tool for analyses the recorded video.

In case of applied voltage stress frequency at 50 Hz, first of visible treeing having 0.4 mm in length was observed after applying voltage stress for 31 minute. Electrical treeing initiated from tip of the needle electrode and expanded to the plane electrode. After applying voltage stress for 90 minute,

the expansion of electrical treeing reached 1.01 mm. Branch like treeing expansion with slowly speed propagation was observed for this voltage stress frequency. Caption picture of electrical treeing from recorded video are illustrated in Fig.5.

In case of applied voltage stress frequency at 100 Hz, first of visible treeing having 0.28 mm in length was observed after applying voltage stress for 22 minute. Electrical treeing initiated from tip of the needle electrode and expanded to the plan electrode. Unlike previous frequency, brush-like treeing was observed for this voltage stress frequency. The expansion of bush-like treeing reached 1.07 mm after applying voltage stress for 66 minute. Propagation speed of bush-like treeing at frequency 100 Hz is faster than that of frequency 50 Hz. Caption pictures of bush-like treeing are illustrated in Fig.6.

In case of applied voltage stress frequency at 500 Hz (ten times of power frequency), first of visible electrical treeing having 0.37 mm in length was observed after applying voltage stress for 15 minute. Electrical treeing initiated from tip of the needle electrode and expanded to the plane electrode same as those two previous frequencies. However, propagation and expansion speeds are faster than those of the two previous frequencies. The expansion of branch-like treeing reached

1.52 mm in length after applying voltage stress for 80 minute.

Caption pictures of branch-like treeing are illustrated in Fig.7.

In case of applied voltage stress frequency at 1000 Hz (twenty times of power frequency), first visible electrical treeing having 0.43 mm in length was observed after applying voltage stress for 9 minute. Also, electrical treeing initiated from tip of the needle electrode same as the previous three frequencies, 50 Hz, 100 Hz, and 500 Hz, respectively. The expansion of electrical treeing reached 1.98 mm in length after applying voltage stress 62 minute. Such treeing occurrence indicates higher propagation speed when comparing with the other frequency. Caption picture of branch-like treeing are illustrated in Fig.8.

In case of applied voltage stress at frequency 2000 Hz (forty times of power frequency), first of visible electrical treeing was observed after applying voltage stress 5 minute. Apparent of visible treeing is the most fastest comparing with the other frequency. Branch-like treeing, also, initiated from tip of needle electrode and reached 2.48 mm in length after applying voltage stress 40 minute. Caption picture of electrical treeing are illustrated in Fig.9.

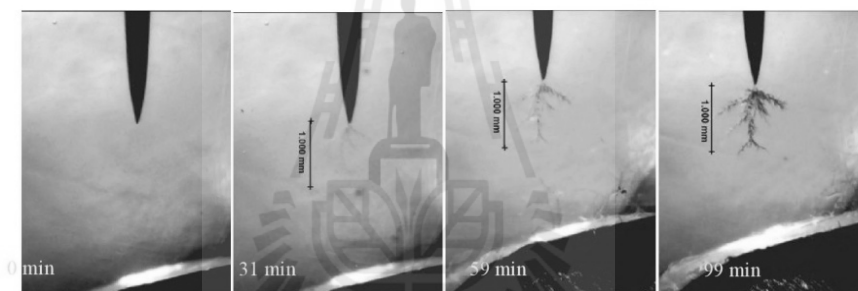


Fig. 5 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 50 Hz

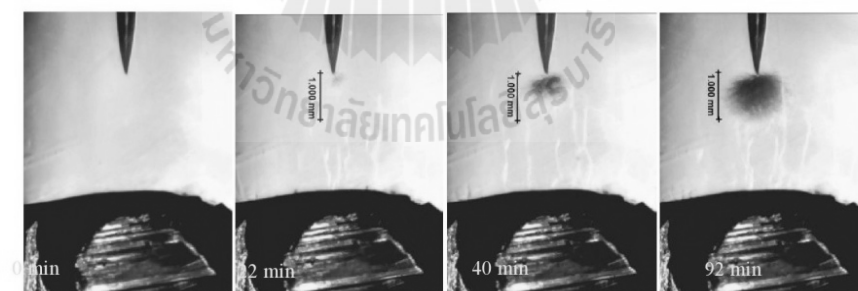


Fig. 6 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 100 Hz

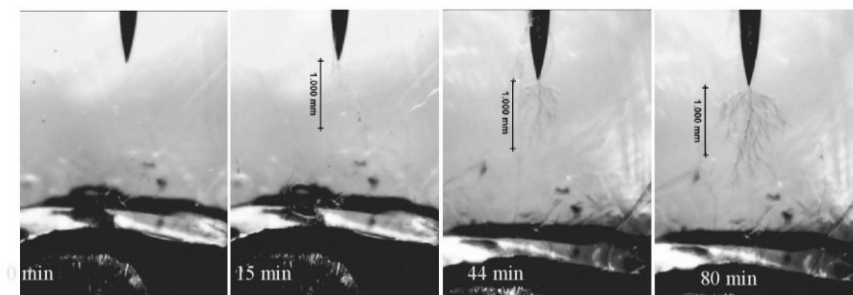


Fig.7 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 500 Hz

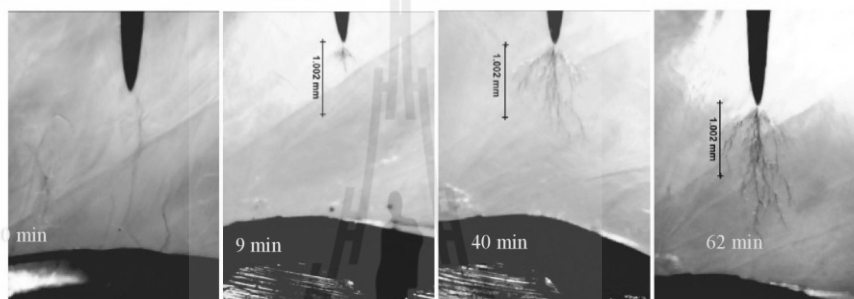


Fig. 8 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 1,000 Hz

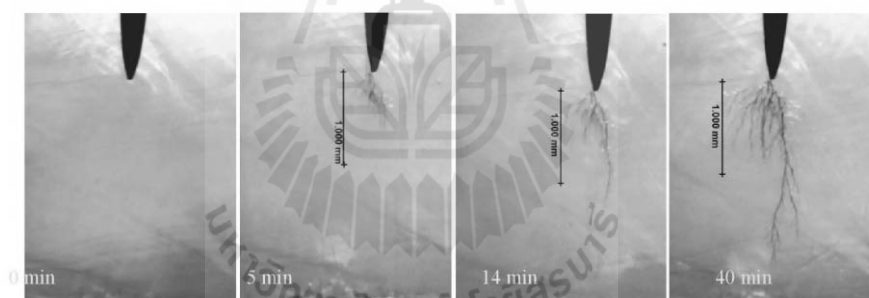


Fig. 9 Electrical treeing of applied voltage stress frequency at 2,000 Hz

TABLE I  
COMPARISON PROPAGATION LENGTH AND PROPAGATION TIME OF ELECTRICAL TREERING

50 Hz		100 Hz		500 Hz		1,000 Hz		2,000 Hz	
Length (mm)	Time (min)	Length (mm)	Time (min)	Length (mm)	Time (min)	Length (mm)	Time (min)	Length (mm)	Time (min)
0.40	31	0.28	22	0.37	15	0.43	9	0.78	5
0.41	35	0.31	28	0.41	21	0.51	15	0.81	7
0.43	37	0.39	33	0.48	25	0.59	20	0.87	9
0.49	41	0.46	38	0.59	29	0.75	25	0.93	11
0.53	43	0.58	40	0.67	35	0.86	30	0.99	12
0.61	48	0.61	42	0.75	37	0.98	35	1.23	14
0.68	51	0.64	46	0.80	41	1.11	37	1.32	16
0.72	55	0.73	50	0.91	44	1.30	40	1.38	17
0.86	59	0.81	56	1.06	50	1.46	44	1.43	18
0.91	63	0.89	60	1.21	55	1.53	49	1.55	20
0.96	69	0.99	66	1.35	59	1.61	54	1.63	24
1.00	74	1.07	70	1.41	64	1.73	56	1.75	28
1.00	84	1.07	75	1.51	71	1.85	59	1.98	32
1.01	90	1.07	80	1.51	77	1.89	60	2.13	36
1.01	99	1.07	92	1.52	80	1.98	62	2.48	40

In order to examine the effect of applied voltage stress frequency, propagation length and propagation time of electrical treeing were measured by using video caption pictures. The measuring results illustrated in Table I and were plotted together, as shown in Fig. 10. As shown in Table I, initial time of visible treeing (recorded video) decreases with increasing in applied voltage frequency. Obviously, as shown in Fig. 10, propagation speed of electrical treeing increases with increasing in applied voltage frequency. The experimental results show that voltage stress frequency is one of dominant effect to the occurrence of electrical treeing. Furthermore, as illustrated in Table II, Two types of electrical treeing, bush-like and branch-like treeing were observed from the experimental.

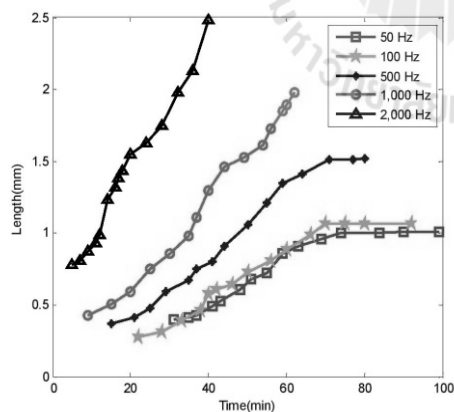


Fig. 10 Propagation characteristics of electrical trees

TABLE II  
PATTERN OF ELECTRICAL TREERING

Frequency (Hz)	Time (min)	Treering length (mm)	Treering characteristic
50	99	1.01	Branch tree
100	92	1.07	Bush tree
500	80	1.52	Branch tree
1,000	62	1.98	Branch tree
2,000	40	2.48	Branch tree

#### IV. CONCLUSION

The following conclusions are given according to the experimental results.

- (1) Initial time of visible electrical treeing decrease with increasing in applied voltage stress frequency.
- (2) Obviously, propagation speed of electrical treeing increase with increasing in applied voltage stress frequency.
- (3) Two types of electrical treeing, bush-like and branch-like treeing, were observed.

#### ACKNOWLEDGMENT

The Authors would like to thank you Suranaree University of Technology for financial support.

#### REFERENCES

- [1] J. V. Champion, S. J. Dodd, Y. Zhao, A. S. Vaughan, M. Brown, A.E. Davies, S. J. Sutton and S. G. Swingle, "Morphology and Growth of Electrical Trees in a Propylene/ethylene Copolymer", *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 8, pp. 284-292, 2001.
- [2] J. V. Champion, S. J. Dodd, A. S. Vaughan, Y. Zhao, and S. J. Sutton, "Effect of Voltage, Temperature and Morphology on Electrical Treeing in Polyethylene Blends", *Proceedings of Dielectric Materials, Measurement and Applications*, No.473, pp. 35-40, 2000.
- [3] E. David, J. Parpal, and J. Crine, "Influence of Internal Mechanical Stress and Strain on Electrical Performance of Polyethylene", *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol. 3, pp. 248-57, 1996.
- [4] Y. Zhao, A. S. Vaughan, J. V. Champion, S. J. Dodd, and S. J. Sutton, "The structure of Electrical Trees in Semi-crystalline Polymers",



- Proceedings of Dielectric Materials, Measurement and Applications*, London Guildhall University UK, IEE Conference Publication, No. 473, pp. 314-319, 2000.
- [5] A. Xie, X. Zheng, S. Li and G. Chen. "Investigations of electrical trees in the inner layer of XLPE cable insulation using computer-aided image recording monitoring", *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol.17, pp.685-693, 2010.
- [6] A. Rawangpia, B. Marungsri and N. Chomnawang "Artificial accelerated ageing test of 22 kV XLPE cable for distribution system applications in Thailand", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Issue 65, pp.220-225, 2010.
- [7] N. Hozumi, M. Okamoto and H. Fukagawa "The influence of morphology on electrical tree initiation in polyethylene under AC and impulse voltages", *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol.25, pp.707-714, 1990.
- [8] X. Zheng and G. Chen, "Propagation mechanism of electrical tree in XLPE cable insulation by investigating a double electrical tree structure", *IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation*, Vol.15, pp.800-807, 2008.
- [9] A.S. Xie and X.Q. Li, "Electrical trees in inner and outer layer of different voltage rating XLPE cable insulation", *International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM2008)*, pp.380-383, 2008.
- [10] N. Yoshimura, E. Hirade, Y. Changmin, H. Miyata and T. Niwa, "Effect of Interface Pressure on Treecing Deterioration in Cross linked Polyethylene", *Proceeding of International Conference on Property and Application of Dielectric Material*, pp. 444-447, 1994.
- [11] M.N. Arbab and D.W. Auckland: "Growth of electrical trees in solid insulation" *IEE Proceeding of Science*, Vol. 136, No. 2, pp. 73-78, 1989.
- [12] F. Noto and N. Yoshimura, "Voltage and Frequency Dependence of Tree Growth in Polyethylene", *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 206-217, 1974.

Aichi, Japan in 2006, all in electrical engineering, respectively. Dr. Marungsri is currently an assistant professor in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His areas of interesting research topic are high voltage insulation technologies and electrical power system.



**Ratthakhet Thiamsri** was born in Angthong, Thailand, in 1987. He received his B.Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2009. Currently, He is a master degree student in school of Electrical Engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology. His interesting research areas are high voltage technology applications, high voltage insulation technology and power system technology.



**Nattawut Ruangkajonmathee** was born in KhonKaen, Thailand in 1987. He received his B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, in 2009. Currently, he is a master degree student in school of Electrical Engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology. His interesting research topic is high voltage insulation technology.



**Anant Oonsivilai**, was born in KhonKaen Province, Thailand, in 1963. He received his B.Eng from Khon Khan University, and M.Eng. from King Mongkut Institute of Technology North Bangkok, Thailand and PhD. From Dalhousie University, Canada, all in Electrical Engineering, in 1986, 1992 and 2000, respectively. Dr. Oonsivilai is currently an Assistant Professor in school of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.



**Boonruang Marungsri** was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand, in 1973. He received his B. Eng. and M. Eng. from Chulalongkorn University, Thailand in 1996 and 1999 and D. Eng. from Chubu University, Kasugai,

# Space Charge Distribution in 22 kV XLPE Insulated Cable by using Pulse Electroacoustic Measurement Technique

N. Ruangajonmathee, R. Thiamsri, and B. Marungsri\*

**Abstract**—This paper presents the experimental results on space charge distribution in cross-linked polyethylene (XLPE) insulating material for 22 kV power distribution system cable by using pulse electroacoustic measurement technique (PEA). Numbers of XLPE insulating material ribbon having thickness 60  $\mu\text{m}$  taken from unused 22 kV high voltage cable were used as specimen in this study. DC electric field stress was applied to test specimen at room temperature (25°C). Four levels of electric field stress, 25 kV/mm, 50 kV/mm, 75 kV/mm and 100 kV/mm, were used. In order to investigate space charge distribution characteristic, space charge distribution characteristics were measured after applying electric field stress 15 min, 30 min and 60 min, respectively. The results show that applied time and magnitude of dc electric field stress play an important role to the formation of space charge.

**Keywords**—Space charge distribution, pulsed electroacoustic (PEA) technique, cross-linked polyethylene (XLPE), DC electrical fields stress.

## I. INTRODUCTION

Nowadays, XLPE is used as an insulating material in high voltage power cable. The advantages of XLPE are high dielectric strength and electrical resistivity combined with good physical properties such as resistance to cracking and moisture penetration [1-2]. However, under certain operating conditions, their good electrical insulation properties may become degraded. For example, trapped or low mobility electrically charged species within the bulk can give rise to space charge, resulting in localized electric stress enhancement. This can cause further concentration of charge and lead to premature failure of the material [3-4]. In a solid dielectric medium, space charge and electric displacement are related by the Maxwell-Gauss equation. In situations where quantities depending on only one spatial coordinate,  $z$ , this equation is expressed as [5]:

$$\frac{\partial D(z)}{\partial z} = \rho(z) = \rho_c(z) + \rho_p(z) \quad (1)$$

where:

$D(z)$  is the electric displacement,  
 $\rho(z)$  is the total charge density,

$\rho_c(z)$  is the volume density of space charges, defined as real charges, being positive or negative, including surface and bulk charge,

$\rho_p(z)$  is the volume density of bound charges, defined in respect to material polarization  $P$  as:

$$\rho_p(z) = -\frac{\partial P(z)}{\partial z} \quad (2)$$

If the polarization is uniform along the  $z$  direction, the total charge is the space charge.

Space charge effects have been widely recognized as one of the major components of the electrical aging processes in polymeric insulation, because it may raise the electric field locally and hence initiate a degradation mechanism in insulator [3, 6-7]. Therefore, it is very important to understand space charge effects to polymer insulation.

PEA technique is a nondestructive method, which has been developed to measure dynamically net charge density as a function of distance through solid insulating materials under an applied voltage. The principle of space charge measurement using the PEA technique is well known and reported elsewhere [5-6, 8-9].

Kwang et al. [10] studied effects of constituents of XLPE on the formation of space charge by PEA technique, cross-linked part of low density polyethylene (LDPE) encourages antioxidant and residual byproducts on the formation of space charge in XLPE have been investigated.

Montanari et al. [11] reported results the effect of humidity on space charge accumulation in XLPE at room temperature and humidity concentration from 5 to 95%. Space charge measurements were performed by using the PEA technique. Different levels of DC constant poling field were considered, ranging from 5 kV/mm to 185 kV/mm.

Chen et al. [12] report the effect of mechanical deformation on space charge dynamics in XLPE. Thin films were peeled from a 66 kV commercial XLPE cable. Space charge measurements under DC electric fields have been monitored using the PEA technique.

Chonget al. [13] reports on space charge evolution in XLPE planar specimens approximately 1.20 mm thick subjected to electric stress level of 30 kV<sub>dc</sub>/mm at four temperatures 25, 50, 70 and 90°C for 24 h. Space charge distributions are dominated by positive charge when tested at high temperatures regardless of specimens treatment and positive charge propagation enhances as testing temperature increases. This can be a major cause of concern as positive charge propagation has been reported to be related to insulation breakdown.

N. Ruangajonmathee and R. Thiamsri are master degree students with Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000, THAILAND.

\*B. Marungsri is with Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000, THAILAND (corresponding author, phone: +66 44224366; fax: +66 4422 4601; e-mail: bmshee@ sut.ac.th).

In this paper, space charge distribution in XLPE insulating material for 22 kV cable under different dc electric fields ranging from 25 kV/mm to 100 kV/mm have been investigated by using the PEA measurement technique. The influence of electric field stress on space charge distribution been investigated.

## II. EXPERIMENTAL

### A. Specimens

Specimens for the experimental made from un-aged 22 kV XLPE distribution power cables having copper conductors 12 mm in diameter and XLPE insulation 6 mm thick, as shown in Fig. 1. This type of power cable is used in underground distribution system of Provincial Electricity Authority of Thailand. Numbers of XLPE ribbon with thickness 60  $\mu\text{m}$  were cut from the insulation around a cable by using a microtome. All specimens were measured precisely before testing so the thickness effect is neglected.

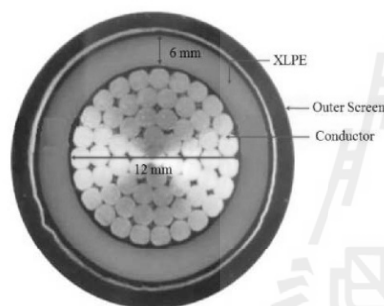


Fig. 1 Cross-section of 22 kV XLPE cable

### B. Test Arrangement and Test Methods

The PEA technique was chosen to detect space charge in specimens due to its simplicity in structure, low cost and easy to implement. A high voltage pulse with 5 ns length is applied to the specimens sandwiched between the two electrodes. The pulse electric field produced interacts with charge layers, generating an electric force which displays charge. The consequence is the formation of pulsed acoustic waves in correspondence of each charge layer with respect to neutrality. The resultant acoustic signals are detected by a piezoelectric transducer (PVDF) so that the charge distribution in the specimens under test can be obtained from the output voltage profile of the transducer. The electric signal obtained in time domain represents the charge distribution. The analysis of space charge profiles is restricted to one dimension.

The schematic diagram for the PEA system used for this experiment is shown in Figure 2. The electric signal obtained in time domain represents the charge distribution. To obtain quantitative charge distribution, a proper calibration is required [14].

Electrodes and specimens were immersed in transformer oil in order to avoid surface flashover in air. The experimental layout is shown in Fig. 3. To observe space charge dynamics, the electric fields ranging from 25 kV/mm to 100 kV/mm were

applied to specimens. The experimental conditions are shown in Table 1.

TABLE I  
TEST CONDITIONS

PEA system	Conditions
Electric Field	25-100 kV/mm
Pulse Voltage	400 V, 5ns, 1kHz
Specimens thickness	60 $\mu\text{m}$
High voltage Amplifier	1:2000

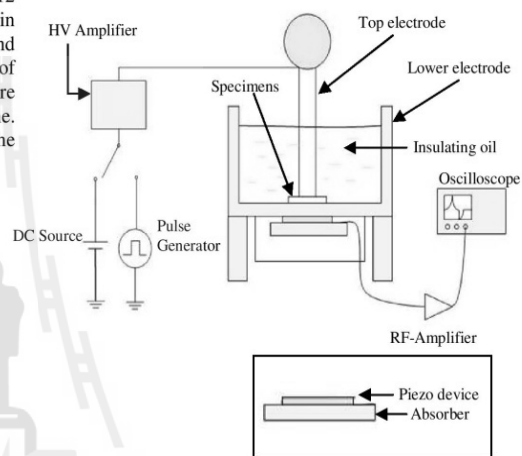


Fig. 2 Test arrangement



Fig. 3 Test chamber

## III. TEST RESULTS AND DISCUSSION

The PEA measurements were performed at room temperature after applying DC field stress for 15 min, 30 min and 60 min, respectively. The experimental were carefully conducted in order to obtain the precisely results. Measurement results for each electric field stress level are illustrated in Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7, respectively.

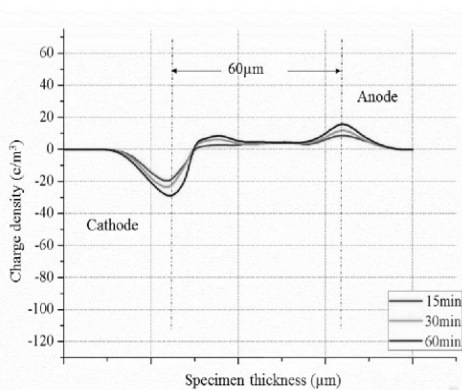


Fig. 4 Space charge distribution in the presence of the applied electric field 25 kV/mm

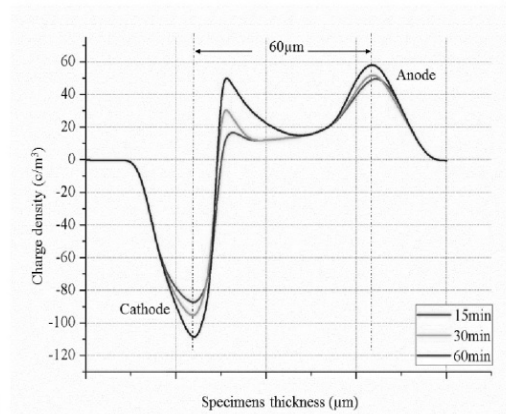


Fig. 7 Space charge distribution in the presence of the applied electric field 100kV/mm

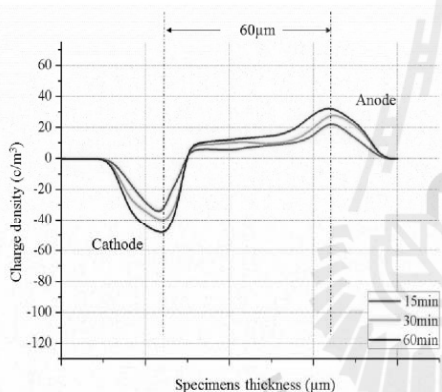


Fig. 5 Space charge distribution in the presence of the applied electric field 50 kV/mm

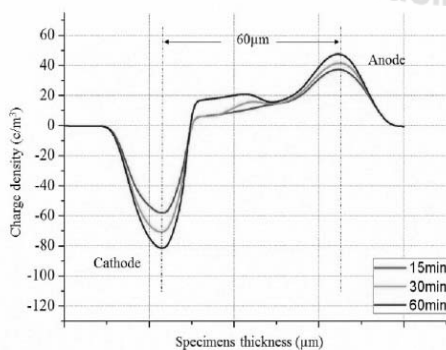


Fig. 6 Space charge distribution in the presence of the applied electric field 75kV/mm

As illustrated in Fig. 4-7, magnitude of space charge increases with increasing magnitude of electric field stress. Higher formation rate of space charge obtained when applying higher electric field stress. Furthermore, the relation between charging time and the charge density at different applied DC voltage can be seen. Under same electric field stress, magnitude of space charge increases with increasing charged time.

Fig. 8 and Fig. 9 show the relation between charging time and the charge density at cathode and anode, respectively.

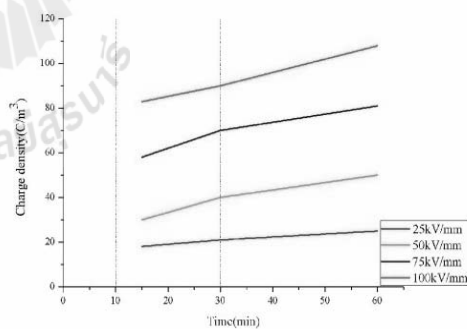


Fig. 8 The relation between charging time and the charge density at cathode

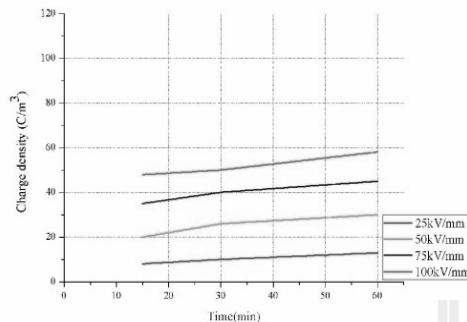


Fig.9 The relation between charging time and the charge density at anode

#### IV. CONCLUSION

Space charge distribution characteristics in XLPE ribbon at the applied electric fields ranging from 25 to 100 kV/mm have been observed over a period of 15 min, 30 min and 60 min., respectively using the PEA technique. The following conclusions are given.

- (1) The characteristics of space charge formation at the two electrodes after applying different magnitude of DC electric field stress were obtained.
- (2) Magnitude of DC electric field stress and time applying DC field stress has an important role to space charge distribution in XLPE material.

#### ACKNOWLEDGMENT

The Authors would like acknowledge Suranaree University of Technology for financial support.

#### REFERENCES

- [1] R. Arrighi, "From Impregnated Paper to Polymeric Insulating Material in Power Cables", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 21, 1986, pp.7-18.
- [2] T. L. Hanley, R. P. Burford, R. J. Fleming and K. W. Barber, "A General Review of Polymeric Insulation for Use in HVDC Cables", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 19, No. 1, 2003, pp. 13-24.
- [3] Y. Zhang, J. Lewiner, C. Alquié and N. Hampton "Evidence of strong correlation between space charge buildup and breakdown in cable insulation", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 4, 1997, pp. 83-778.
- [4] Z. Liu, R. Liu, H. Wang and W. Liu "Space charge and initiation of electrical trees", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 24, 1989, pp. 9-83.
- [5] O. Gallot-Lavallée, V. Griseri, G. Teyssedre and C. Laurent, "The pulsed electro-acoustic technique in research on dielectrics for electrical engineering : Today's achievements and perspectives for the future", *RS-RIGE*, Vol. 8, No. 5, June 2005, pp. 749 – 772.
- [6] L. Dissado, G. Mazzanti and G. C. Montanari, "The Role of Trapped Space Charges in the Electrical Aging of Insulating Materials", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 4, 1997, pp. 496-506.
- [7] C. Le Gressus and G. Blaise, "Breakdown Phenomena Related to Trapping De-Trapping Processes in Wide Band Gap Insulators", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 27, No. 3, 1992, pp. 472-481.
- [8] T. Maeno, H. Kushibe, T. Takada and C.M. Cooke, "Pulsed electroacoustic Method for the measurement of volume charge in e-beam irradiated PMMA", *Proc. IEEE Conf. Electr. Insul. Dielect. Phenomena*, 1985, pp. 389-397.
- [9] T. Maeno, T. Futami, H. Kushibe, T. Takada and C.M. Cooke, "Measurement of spatial charge distribution in thick dielectrics using the pulsed electroacoustic method", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 23, 1988, pp. 433-439.
- [10] S. Suh Kwang, J. Sun Hwang, S. Noh Jin and T. Takada, "Effects of Constituents of XLPE on the Formation of Space Charge", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 1, 1994, pp. 1077-1083.
- [11] G.C. Moniaranari and F. Palmieri, "The effect of humidity on space charge accumulation in XLPE", in *Proc. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2003, pp. 205-208.
- [12] G. Chen and M.R. Kamaruzzaman, "Impact of mechanical deformation on space charge in XLPE", in *Proc. International Conference on Solid Dielectrics*, Winchester, UK, July 8-13, 2007, pp. 511-513.
- [13] Y.L. Chong, G. Chen and Y.F.F. Ho, "Temperature Effect on Space Charge Dynamics in XLPE Insulation", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. 14, 2007, pp. 65-76.
- [14] T. Maeno, "Calibration of the pulsed electroacoustic method for measuring space charge density", *Trans. IEE Japan*, Vol. 119-A, 1999, pp. 114-119.



insulation technology.



voltage technology applications, high voltage insulation technology and power system technology.



of Technology, Thailand. His areas of interest are high voltage insulation technologies and electrical power system.

**Nattawut Ruangakajonmathee** was born in Khon Kaen Province, Thailand, in 1987. He received his B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, in 2009. Currently, He is a master degree student in school of Electrical Engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology. His research topic interesting is High voltage

**Ratthakhet Thiamsri** was born in Ang Thong Province, Thailand, in 1987. He received his B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2009. Currently, He is a master degree student in school of Electrical Engineering, Institute of engineering, Suranaree University of Technology. His interesting areas are high

**Boonruang Marungsri** was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand, in 1973. He received his B. Eng. and M. Eng. from Chulalongkorn University, Thailand in 1996 and 1999 and D. Eng. from Chubu University, Kasugai, Aichi, Japan in 2006, all in electrical engineering, respectively. Dr. Marungsri is currently an assistant professor in School of Electrical Engineering, Suranaree University

## ประวัติผู้เขียน

นายรัฐเขต เทียมศรี เกิดเมื่อวันที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2530 ที่อำเภอโพธิ์ทอง จังหวัดอ่างทอง เริ่มศึกษาระดับอนุบาล ที่โรงเรียนวัดม่วงคัน อำเภอโพธิ์ทอง จังหวัดอ่างทอง ประถมศึกษา ที่โรงเรียนวัดนางใน (ละอียดอุปถัมภ์) อำเภอวิเศษชัยชาญ จังหวัดอ่างทอง และสำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนอ่างทองปัทมโรจน์วิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดอ่างทอง เมื่อ พ.ศ. 2548 ในภายหลังได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาและสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2552 จากนั้นจึงได้ศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในกลุ่มวิจัยไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท มีประสบการณ์สอนเป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 4 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 (2) ปฏิบัติการจักรกลไฟฟ้า 2 (3) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 โดยมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังปรากฏในภาคผนวก ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจทางด้านระบบไฟฟ้ากำลัง และวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง